

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Dasar Beton Prategang

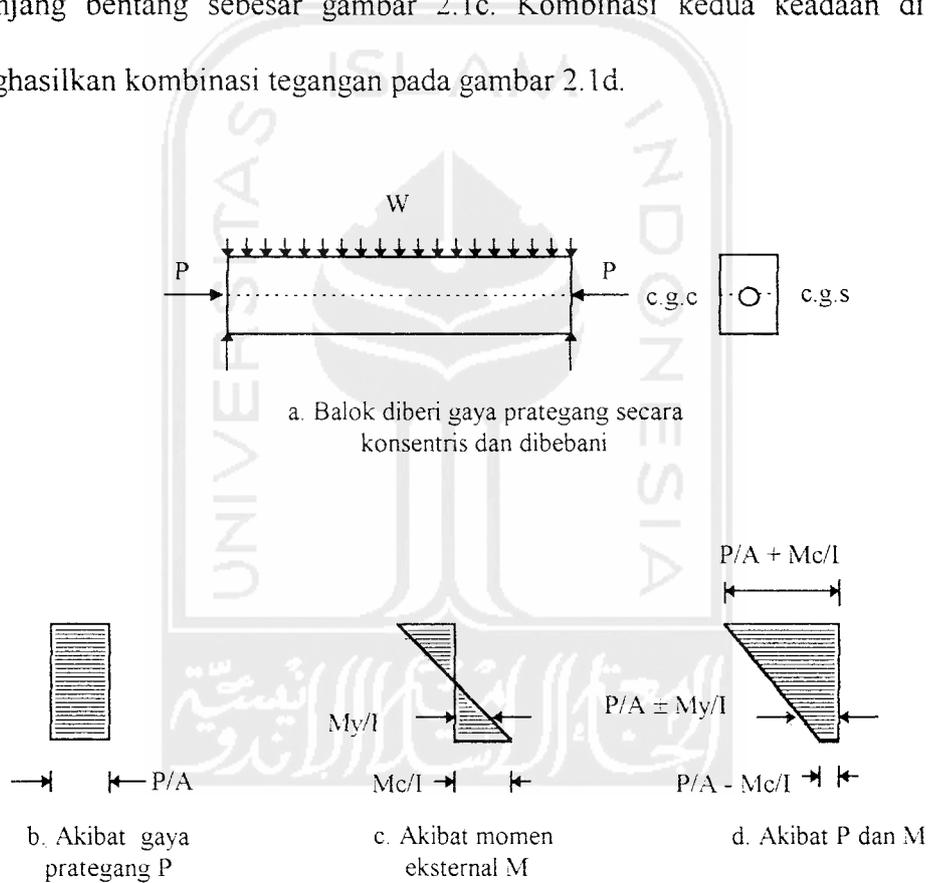
Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban luar, prategang pada umumnya diberikan dengan menarik baja tulangnya (T.Y. Lin, 1993). Beton prategang memerlukan material beton dengan kekuatan tekan tinggi pada usia cukup muda, dan baja (tendon) dengan kekuatan tarik tinggi. Ada tiga konsep yang berbeda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Ketiga konsep tersebut adalah sebagai berikut (T. Y. Lin, 1993).

2.1.1 Sistem Prategang untuk Mengubah Beton menjadi Bahan yang Elastis

Konsep ini dikemukakan oleh Eugene Freyssinet, yang memvisualisasikan beton prategang adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan gaya desak terlebih dahulu (pratekan) pada beton. Dari konsep ini lahirlah kriteria tidak ada tegangan tarik pada beton. Umumnya telah diketahui jika tidak ada tegangan tarik pada beton berarti tidak akan terjadi retak, dan beton tidak merupakan bahan yang getas lagi melainkan berubah menjadi bahan yang elastis. Atas dasar pandangan ini, beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan yaitu gaya internal dan gaya eksternal.

1. Tendon Konsentris

Gaya prategang P menghasilkan gaya tekan P yang bekerja pada titik berat beton, seperti diperlihatkan pada gambar 2.1a. Akibat gaya prategang P , maka akan terjadi tegangan tekan merata seperti ditunjukkan oleh gambar 2.1b. Jika M adalah momen eksternal yang bekerja pada penampang, maka tegangan pada setiap titik sepanjang bentang sebesar gambar 2.1c. Kombinasi kedua keadaan di atas akan menghasilkan kombinasi tegangan pada gambar 2.1d.



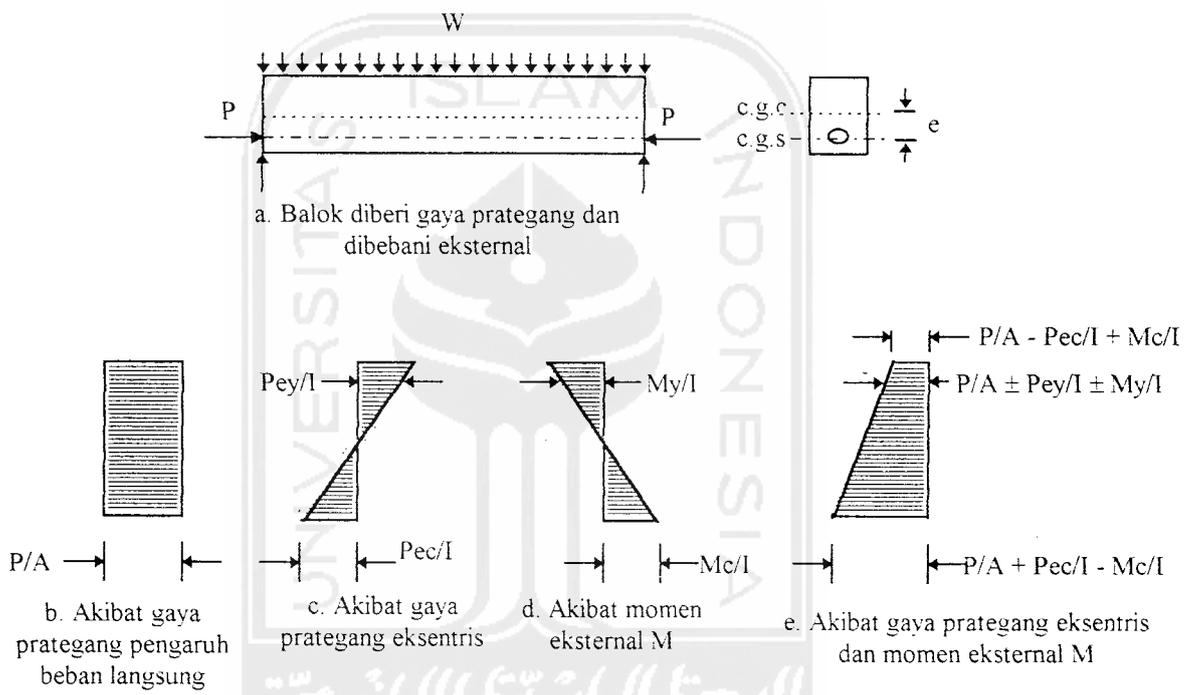
Gambar 2.1 Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang Konsentris

Distribusi tegangan yang dihasilkan pada penampang konsentris akibat gaya prategang dan momen eksternal adalah :

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{M y}{I} \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Tendon Eksentris

Pada gambar 2.2a ditunjukkan suatu balok dengan beban eksternal W diberi gaya prategang P dengan eksentrisitas e dari titik c.g.c. Eksentrisitas tersebut akan menghasilkan momen dan tegangan seperti gambar 2.2c. Tegangan yang bekerja akibat gaya prategang P , menghasilkan tegangan merata seperti pada gambar 2.2b.



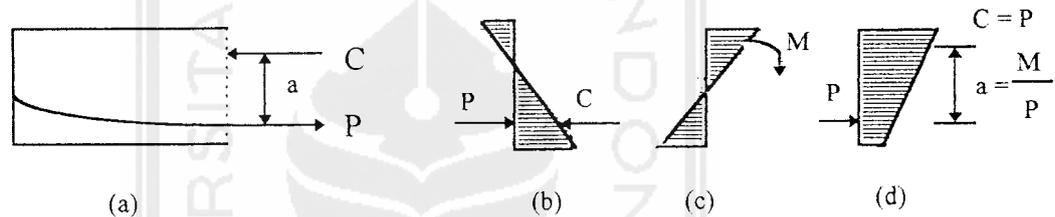
Gambar 2.2 Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang Eksentris

Adanya momen eksternal M menghasilkan diagram tegangan gambar 2.2d. Gabungan dari distribusi tegangan yang dihasilkan pada penampang eksentris akibat gaya prategang dan beban eksternal ditunjukkan pada gambar 2.2e, besar tegangan yang terjadi pada penampang beton tersebut adalah :

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{P e y}{I} \pm \frac{M y}{I} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.1.2 Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton

Konsep ini menganggap beton prategang sebagai kombinasi (gabungan) dari baja mutu tinggi dan beton mutu tinggi, seperti pada beton bertulang, tulangan baja digunakan untuk menahan tarik dan beton menahan tekan. Dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal. Sebagai contoh, suatu penampang balok dengan tegangan tekan beton C dan tegangan tarik P membentuk kopel dengan lengan kopel a pada gambar 2.3a.



Gambar 2.3 Gambar Kopel Penahan Internal Beton Prategang

Ditinjau balok di atas dua perletakan bebas.

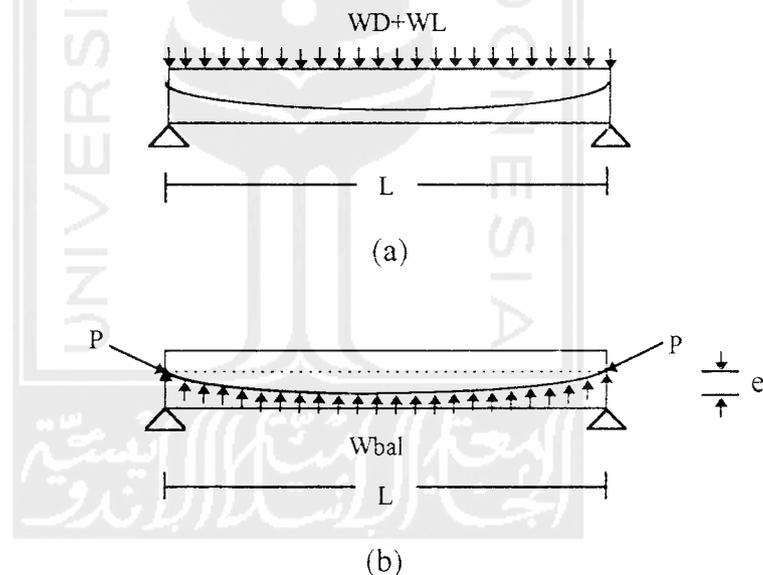
1. Bila balok diasumsikan tanpa berat, maka gaya tekan C pada penampang besarnya sama dengan gaya prategang P (gambar 2.3b).
2. Bila ada momen lentur yang bekerja pada penampang, maka diagram tegangan akan seperti gambar 2.3c.
3. Gambar 2.3d, merupakan resultan tegangan yang bekerja. Jumlah gaya-gaya pada penampang itu sama, $C = P$.

Tegangan yang terjadi pada penampang beton prategang dirumuskan,

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{P e y}{I} \dots\dots\dots (2.3)$$

2.1.3 Sistem Prategang untuk Mencapai Perimbangan Beban (*load balancing*)

Konsep *load balancing* pada prinsipnya adalah gaya-gaya luar (beban mati dan sebagian beban hidup) pada struktur akan diimbangi oleh gaya-gaya dalam yang disebabkan oleh gaya prategangan. Penerapan dari konsep ini beton dianggap sebagai benda bebas dan mengefektifkan gaya prategang untuk mengantisipasi beban luar yang bekerja pada beton sepanjang bentangan. Sebagai contoh pada gambar 2.4a, sebuah balok prategang di atas dua tumpuan (*simple beam*) dengan tendon berbentuk parabola serta menerima beban terbagi rata.



Gambar 2.4 Balok Prategang dengan Tumpuan Sederhana

Gaya prategang dengan eksentrisitas e menimbulkan reaksi ke atas (*balanced load*) seperti ditunjukkan pada gambar 2.4b, dengan besar beban W_{bal} dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$W_{bal} = \frac{8 P e}{L^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Apabila beban melebihi dari beban imbang (*balanced load*), maka kelebihan dari beban tersebut akan menjadi beban yang tidak diimbangi (*unbalanced load*) yang akan mengakibatkan momen beban tidak terimbangi (*unbalance moment*). Untuk lebih jelasnya akan terlihat dalam persamaan berikut:

$$W_{unb} = W_{tot} - W_{bal} \dots\dots\dots (2.5)$$

Konsep beban berimbang ini seringkali menghasilkan analisa yang lebih sederhana. Pada kondisi imbang, momen lentur akibat beban luar yang diimbangi sama dengan nol, sehingga beton hanya dibebani oleh gaya prategang. Pada kondisi ini tegangan pada beton yang timbul merata sebesar :

$$f = \frac{P}{A_c} \dots\dots\dots (2.6)$$

Momen beban tidak terimbangi (*unbalance moment*) akan menimbulkan tegangan tambahan pada penampang beton, yang akan didukung oleh tegangan dalam beton, sehingga persamaan tegangan-tegangan yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$f = \frac{P}{A_c} \pm \frac{M_{unb}}{S} \dots\dots\dots (2.7)$$

Konsep *load balancing* ini cocok untuk diterapkan pada struktur statis tak tentu seperti pada konstruksi *flat plate* bentang menerus. Hal ini disebabkan prinsip-prinsip perimbangan beban pada *flat plate* dilakukan dengan dua arah penegangan, sehingga pada masing-masing arah memiliki distribusi tegangan yang merata dan tidak melendut akibat pembebanan.

2.2 Cara Penegangan

Metode yang paling luas dipakai untuk memberikan gaya prategang pada elemen beton struktural adalah dengan menarik tendon dengan alat mekanik. Terdapat dua prinsip yang berbeda dalam proses penegangan yaitu dengan cara pratarik dan pascatarik (Winarni Hadipratomo, 1994).

2.2.1 Pratarik (*Pre-tensioning*)

Pada prinsip ini tendon ditegangkan dengan alat bantu sebelum beton dicor dan gaya prategang dipertahankan sampai beton mencapai kekuatan yang diperlukan, kemudian tegangan pada jangkar dilepas perlahan-lahan dan tendon dijangkarkan pada ujung-ujung struktur. Untuk sistem pratarik, cara yang sederhana yaitu dengan menarik tendon di antara dinding penahan (*bulkhead*) kemudian diangkurkan pada ujung dinding penahan dan selanjutnya beton dicor serta dipadatkan sesuai bentuk yang diinginkan. Setelah beton mencapai kekuatan yang disyaratkan, maka tendon dipotong atau dilepas dari dinding penahan dan gaya prategang dialihkan ke beton.

2.2.2 Pasca tarik (*Post-tensioning*)

Pada prinsip ini beton dicor dulu dan dibiarkan mengeras, kemudian tendon ditegangkan. Tendon ditempatkan dalam selubung sesuai posisi yang telah ditentukan, kemudian dicor. Bila kekuatan beton yang diperlukan telah tercapai, maka tendon ditegangkan diujung-ujungnya dan dijangkar. Gaya prategang ditransfer ke beton melalui jangkar pada saat tendon ditegangkan. Untuk sistem pasca tarik, ada dua macam selubung (*conduit*) yang digunakan yaitu untuk sistem prategang dengan rekatan (*bonded*) dan tanpa rekatan (*unbonded*).

1. Tendon terikat (*bonded tendon*)

Jika tendon direncanakan dengan rekatan, maka setelah kabel dijangkar, pada selubung dimasukkan adukan beton disertai tekanan ke dalam ruang antara kabel dan beton (*grouting*). Pada umumnya selubung terbuat dari pipa logam besi yang digalvanis.

2. Tendon tidak terikat (*unbonded tendon*)

Jika tendon direncanakan tanpa rekatan, biasanya selubung dipakai plastik atau kertas tebal dan tendon diberi minyak untuk mempermudah penarikan dan pencegahan karat.

2.3 Tahap-tahap Pembebanan pada Beton Prategang

Salah satu pertimbangan istimewa pada beton prategang adalah banyaknya tahapan pembebanan yang harus diperhatikan. Adapun tahap pembebanan meliputi tahap awal, tahap antara dan tahap akhir (T.Y. Lin, 1993). Dalam analisa ini hanya dibahas pada tahap awal yaitu saat pemberian gaya prategang dan tahap akhir pada kondisi beban batas dan pada pembebanan tetap.

1. Saat Pemberian Gaya Prategang

Tahap awal pembebanan, saat struktur diberi gaya prategang dan belum menerima beban eksternal, kekuatan tendon harus disesuaikan dengan tegangan ijin untuk menghindari putusny sebagian atau seluruh tendon. Untuk beton belum cukup umur, kehancuran beton pada pengangkuran saat penarikan tendon dapat terjadi jika mutunya rendah atau jika beton kropos, untuk itu perlu adanya kontrol tegangan beton pada tahap ini.

2. Saat Beban Batas (*ultimate load*)

Kekuatan batas dari struktur didefinisikan sebagai beban maksimum yang dapat dipikul sebelum hancur. Struktur yang didisain berdasarkan tegangan kerja mungkin tidak mempunyai ketahanan yang cukup terhadap kelebihan beban. Karena disyaratkan bahwa sebuah struktur memiliki kapasitas minimum memikul beban yang lebih besar, maka perlu ditentukan kekuatan batasnya (*ultimate strength*).

3. Saat Beban Bekerja Tetap (*sustained load*)

Saat beban bekerja tetap yang sesungguhnya (sering terdiri hanya dari beban mati) akan terjadi lendutan ke atas atau ke bawah yang merupakan faktor penentu dalam disain, sehingga seringkali harus membatasi besar lendutan akibat beban tetap.

2.4 Kehilangan Gaya Prategang

Gaya prategang yang diberikan pada beton mengalami pengurangan secara berangsur-angsur sejak tahap transfer akibat berbagai sebab, secara umum hal ini dinyatakan sebagai kehilangan prategang. Berbagai kehilangan gaya prategang yang dijumpai dalam sistem pratarik dan pasca tarik dapat dilihat dalam tabel 2.1 (N. Krishna Raju, 1989).

Tabel 2.1 Macam-macam Kehilangan Prategang pada Struktur

Pratarik	Pasca tarik
<ul style="list-style-type: none"> • Deformasi elastis beton • Relaksasi tegangan pada baja • Penyusutan beton • Rangkak beton 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak ada kehilangan prategang akibat deformasi elastis kalau semua kawat ditarik secara bersamaan. Kalau kawat-kawat ditarik secara berurutan, akan terdapat kehilangan prategang akibat deformasi elastis beton • Relaksasi tegangan pada baja • Penyusutan beton • Rangkak beton • Gesekan • Tergelincirnya angkur

Sulit untuk mengambil rata-rata jumlah kehilangan gaya prategang, karena hal ini tergantung dari banyak faktor, sifat-sifat beton dan baja, pemeliharaan dan keadaan kelembaban, besar dan waktu penggunaan prategang. Di dalam disain beton prategang sudah menjadi kebiasaan untuk mengasumsikan kehilangan prategang total, prosentase dari kehilangan prategang dalam kondisi normal dapat dilihat pada tabel di bawah ini (T.Y.Lin, 1993).

Tabel 2.2 Perkiraan Kehilangan Prategang

	Pratarik (%)	Pasca tarik (%)
• Perpendekan elastik dan lenturan	4	1
• Rangkak beton	6	5
• Susut beton	7	6
• Relaksasi baja	8	8
Kehilangan total	25	20

Dalam tabel 2.2 dianggap bahwa telah dilakukan pemberian tegangan yang lebih besar untuk mengurangi rangkak pada baja dan mengatasi kehilangan gaya prategang akibat gesekan dan pengangkutan.

2.5 Pengertian *Flat Plate* Beton Prategang

Flat plate beton prategang adalah pelat beton prategang yang diperkuat oleh baja prategang dalam dua arah sedemikian hingga meneruskan bebannya secara langsung ke kolom-kolom yang mendukungnya tanpa adanya balok atau pertebalan pelat di sekeliling kolom (*drop panel*), umumnya dipakai apabila panjang bentangan tidak terlalu besar dan beban yang bekerja bukan merupakan beban yang berat (Phill M. Ferguson, 1986).

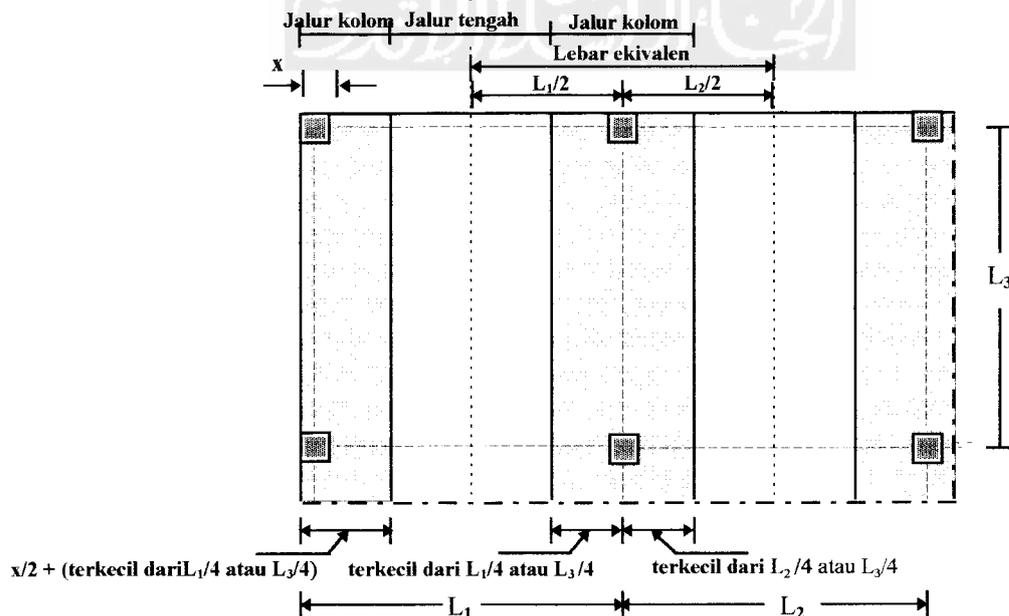
2.6 Karakteristik *Flat Plate* Beton Prategang

2.6.1 Perilaku

Flat plate beton prategang mempunyai karakteristik aksi pelat dua arah, apabila pelat dibebani, maka pelat tersebut akan melengkung menyerupai permukaan piring, hal ini berarti pada sembarang titik pada pelat tersebut akan melengkung pada dua arah utamanya. Besar momen lentur yang terjadi sebanding dengan kelengkungannya, berarti pada kedua arah tersebut juga terdapat momen lentur. Untuk memikul momen-momen ini, pelat tersebut harus diberikan tendon pada kedua arahnya saling tegak lurus terhadap ujung-ujung pelat (Winter dan Nilson, 1993).

2.6.2 Jalur Pembebanan

Beban-beban yang bekerja pada *flat plate* langsung ditransfer dari pelat ke kolom. Dengan menganggap jalur kolom (*column strip*) yang memberikan aksi sebagai balok-balok dan jalur tengah dengan jarak di antara kolom pada masing-masing arah dengan beban merata per-satuan luas, sebagaimana terlihat dalam gambar 2.5.



Gambar 2.5 Konsep *Flat Plate* Dijadikan Balok Ekuivalen

SK SNI T-15 1991 pasal 3.6.6.4 telah mengatur distribusi momen-momen positif dan negatif pada jalur kolom, besarnya presentasi dari momen perencanaan dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Prosentase Momen dari Jalur Kolom.

Perbandingan ukuran L_2/L_1			0,5	1,0	2,0
Momen negatif pada tumpuan luar	$\alpha L_1/L_2 = 0$	$\beta_t = 0$	100	100	100
		$\beta_t \geq 2,5$	75	75	75
	$\alpha L_1/L_2 \geq 1,0$	$\beta_t = 0$	100	100	100
		$\beta_t \geq 2,5$	90	75	45
Momen positif	$\alpha L_1/L_2 = 0$	60	60	60	
	$\alpha L_1/L_2 \geq 1,0$	90	75	45	
Momen negatif pada tumpuan dalam	$\alpha L_1/L_2 = 0$	75	75	75	
	$\alpha L_1/L_2 \geq 1,0$	90	75	45	

Sedangkan untuk jalur tengah prosentase momennya adalah sisa dari momen jalur kolom tersebut dalam setiap arah, untuk nilai-nilai di antara nilai yang ada pada tabel 2.3 di atas perlu dilakukan interpolasi secara linier.

2.6.3 Distribusi Tendon

Penempatan tendon dimaksudkan untuk memberikan tegangan internal pada pelat guna mengantisipasi tegangan eksternal yang terjadi akibat beban yang bekerja. Momen total pada tumpuan jauh lebih besar pada jalur kolom dibandingkan pada jalur tengah, komisi ACI menyarankan distribusi tendon pada panel dengan perbandingan panjang dan lebar yang tidak melebihi 1,33 adalah sebagai berikut (T.Y.Lin, 1993) :

1. pada bentang sederhana yaitu dengan menempatkan 55% sampai 60% tendon pada jalur kolom dan sisanya pada jalur tengah,

2. untuk bentang menerus ditempatkan 65% sampai 75% tendon pada jalur kolom dan sisanya pada jalur tengah.

SK SNI T-15 1991 3.11.12 mensyaratkan jarak tendon atau kelompok tendon harus tidak lebih dari 8 kali tebal pelat ataupun 1,5 m. Spasi dari tendon tersebut harus mampu menghasilkan tegangan tekan rata-rata minimum (sesudah memperhitungkan kehilangan prategang) sebesar 0,9 Mpa pada penampang pelat. Pada penampang geser kritis kolom harus disediakan dua tendon dalam setiap arah.

2.7 Pengangkuran Ujung

Prinsip pengangkuran ujung dalam prakteknya terdapat perbedaan cara pelaksanaannya menurut sistem prategang yang dipakai. Pada sistem pratarik, rekatan antara tendon dan beton berfungsi untuk mentransfer gaya prategang yang terjadi. Ketergantungan pada rekatan untuk memindahkan gaya prategang antara tendon dan beton mengakibatkan dibutuhkan kabel yang berdiameter kecil. Untuk kabel yang lebih besar dari 3,18 mm daya rekat kabel prategang dapat ditingkatkan dengan membentuk ciri-ciri khusus pada permukaan, misalnya kabel dibuat bergelombang atau berulir. Untuk kabel yang besar diperlukan tambahan pengangkuran ujung untuk menghindari retak-retak yang terjadi di dekat ujung beton yang akan mengakibatkan lepasnya rekatan dan bergesernya tendon. Tambahan pengangkuran ujung ini menguntungkan meskipun menurut pengalaman dengan tendon untaian tujuh kawat sampai diameter 15.2 mm telah menunjukkan tidak diperlukannya angkur ujung pada struktur pratarik.

Pada metode pasca tarik semua tendon dipasang di dalam lubang atau selubung tendon, yang dibentuk terlebih dahulu dan kemudian diangkurkan pada permukaan

ujung beton. Gaya prategang didistribusikan terpusat oleh pelat angkur baja, sehingga menimbulkan tegangan-tegangan pada daerah ujung (*endblock*). Pada sistem pasca tarik ada tiga prinsip yang dipakai dalam perencanaan pengankuran ujung.

1. Dengan prinsip kerja pasak yang menghasilkan penjepit gesek pada kabel.
2. Dengan perletakan langsung dari kepala paku keling atau baut yang dibuat pada ujung kabel.
3. Dengan melilitkan kabel ke sekeliling beton.

Pada umumnya metode yang sering dipakai dan telah dikembangkan adalah berdasarkan prinsip kerja pasak dan perletakan langsung. Metode yang terakhir, melilitkan kabel di sekeliling beton belum dipakai secara luas.

