

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Beton Pratekan

2.1.1. Sejarah singkat beton pratekan⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

Beton pratekan muncul sebagai akibat adanya ketidakpuasan yang didapat dari beton bertulang sebagai bahan konstruksi yaitu timbulnya retak-retak pada beton bertulang pada bagian tarik. Hal ini tidak akan tercapai apabila seluruh penampang menderita desak atau tidak terjadi tegangan tarik yang lebih besar dari pada tegangan tarik izinnya.

Perkembangan beton pratekan dimulai dimana gaya pratekan yang dibuat hanya ditujukan untuk menciptakan tekanan permanen pada beton guna memperbaiki kekuatan tariknya. Kemudian menjadi lebih luas, bahwa memberikan gaya pratekan dengan mempergunakan baja juga penting dengan pemanfaatan baja mutu tinggi yang lebih efisien. Memberikan gaya pratekan berarti membuat tegangan desak permanen di dalam struktur dengan tujuan memperbaiki perilaku dan kekuatannya pada bermacam-macam pembebanan.

Pada tahun 1886, P.H. Jackson, seorang insinyur dari San Fransisco, California, mendapatkan hak paten untuk pengikatan batang baja pengikat ke batu buatan dan lengkungan beton yang berfungsi sebagai plat lantai. Doehring dari Jerman membuat plat dan balok-balok kecil dengan memakai kabel-kabel tarik yang tertanam dalam

beton untuk menghindari retak-retak, pelaksanaannya dilakukan pada tahun 1888.

Gagasan dari pratekan untuk melawan tegangan-tegangan yang disebabkan oleh pembebanan pertama-tama diperkenalkan oleh Madl, seorang insinyur dari Austria pada tahun 1896. Kemudian pada tahun 1907 dikembangkan oleh M. Koenen dari Jerman, dengan melaporkan kehilangan gaya pratekan yang disebabkan oleh perpendekan elastis beton.

Pada tahun 1928, C.R. Steiner dari Amerika Serikat menemukan terjadinya kehilangan gaya pratekan yang disebabkan oleh penyusutan beton. Di tahun 1923, Emperger dari Vienna, telah mengembangkan suatu metode untuk membuat pipa-pipa beton bertulang dari kabel dengan membalut kabel-kabel baja tegangan tinggi pada pipa-pipa.

Pemakaian tendon yang tidak dibalut pertama-tama ditunjukkan oleh Deschinger pada tahun 1928 saat pembangunan suatu jembatan utama dengan type gelagar tinggi, dimana kabel-kabel pratekan telah ditempatkan di dalam gelagar tanpa suatu pembalut.

Seorang warga Perancis yang berjasa dalam perkembangan beton pratekan adalah Eugene Freyssinet, pada tahun 1928 mulai memperkenalkan keuntungan-keuntungan dari pemakaian baja dan beton mutu tinggi untuk mengurangi pengaruh kehilangan gaya pratekan yang disebabkan oleh rangkakan dan penyusutan beton.

Pada akhirnya sejak tahun 1935, pemakaian beton pratekan menyebar secara luas. Banyak jembatan bentang



panjang telah dibangun antara tahun 1945 hingga 1950 di Eropa dan Amerika Serikat. Apalagi kekurangan baja di daratan Eropa pada waktu perang dunia telah memberikan dukungan, karena baja yang dibutuhkan untuk beton pratekan lebih sedikit dibandingkan dengan pada beton bertulang.

Pada abad 19 tersebut beton pratekan belum bisa berkembang dengan pesat, hal ini diakibatkan terjadinya susut dan rangkak pada beton yang belum bisa diatasi dengan baik, yang menyebabkan kehilangan tegangan besar, dan beton pratekan akan bersifat seperti beton bertulang biasa.

Untuk saat sekarang ini karena sudah bisa dipergunakan beton dengan mutu tinggi, hingga susut dan rangkak bisa diatasi, walaupun tidak bisa dihilangkan, maka kehilangan tegangan yang terjadi bisa diperkecil sehingga perkembangan beton pratekan sebagai bahan konstruksi sekarang ini bisa dikatakan cukup baik.

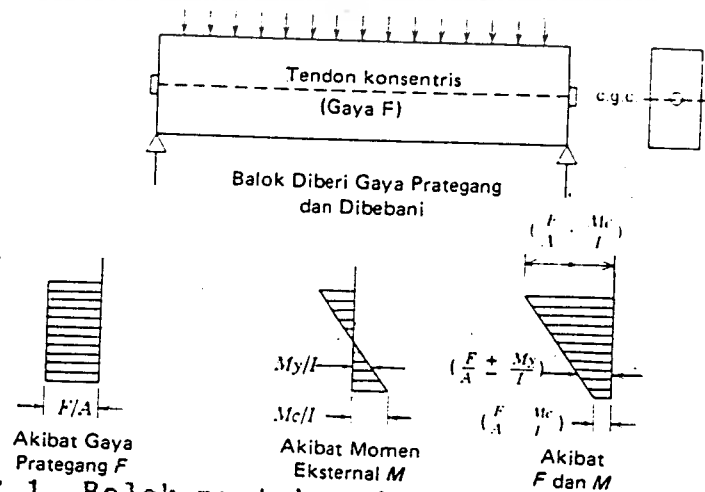
2.1.2. Prinsip-prinsip dasar beton pratekan

Beton pratekan adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan terdistribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal⁽²⁾. Ada tiga konsep berbeda yang dapat dipakai untuk menjelaskan tentang prinsip-prinsip dasar beton pratekan⁽²⁾.

Konsep pertama, sistem pratekan untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis.

Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis dan merupakan buah pemikiran E. Freyssinett. Oleh beliau beton pratekan dianggap sebagai beton yang dirubah dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan cara memberikan tekanan terlebih dahulu pada beton tersebut. Beton yang tidak mampu dalam menahan gaya tarik yang kuat dalam memikul tekanan dirubah sedemikian rupa sehingga bahan yang getas dapat memikul tegangan tarik. Dari konsep ini lahirlah kriteria "tidak ada tegangan tarik" pada beton. Umumnya apabila tidak terjadi tegangan tarik, maka beton tidak akan mengalami retak dan bukan merupakan bahan yang getas lagi, melainkan merupakan bahan yang elastis. Berdasarkan pandangan tersebut, maka beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan, gaya internal pratekan dan beban eksternal, dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya pratekan.

Kita tinjau balok pratekan dengan dukungan sederhana, yang diberi gaya pratekan oleh tendon melalui titik berat penampang.



Gambar 2.1. Balok pratekan dengan tendon konsentris

Gaya tarik sebesar F pada tendon setelah dilepas akan memberikan tekanan pada balok sebesar F juga. Akibat gaya pratekan tersebut, maka pada penampang seluas A akan terjadi tegangan merata pada seluruh penampang sebesar:

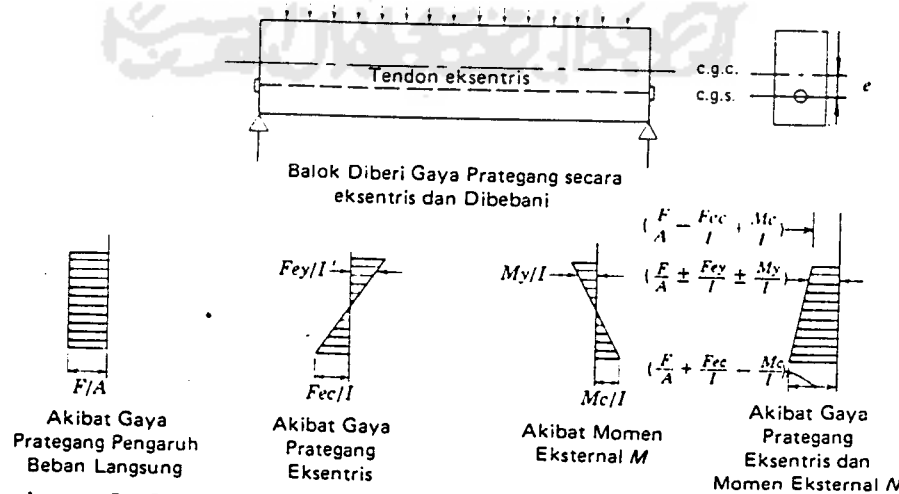
$$f = F/A \quad (2.1)$$

Jika terjadi momen eksternal akibat beban luar dan berat sendiri, maka akan terjadi tegangan pada setiap titik sepanjang penampang sebesar:

$$f = \frac{M \cdot y}{I} \quad (2.2)$$

dimana y adalah jarak serat terluar terhadap titik berat penampang beton dan I adalah momen inersia tampang beton. Jadi tegangan yang terjadi adalah:

$$f = - \frac{F}{A} + \frac{M \cdot y}{I} \quad (2.3)$$



Gambar 2.2. Balok pratekan dengan tendon eksentris



Persamaan 2.3 dipergunakan apabila gaya pratekan yang terjadi berimpit dengan titik berat penampang. Sedangkan jika gaya pratekan tidak berimpit dengan titik berat penampang, maka akan terjadi momen akibat eksentrisitas gaya pratekan yang akan menimbulkan tegangan sebesar:

$$f = + \frac{P.e.y}{I} \quad (2.4)$$

sehingga tegangan akhir apabila beban luar telah bekerja adalah:

$$f = - \frac{F}{A} + \frac{P.e.y}{I} + \frac{M.y}{I} \quad (2.5)$$

Konsep kedua, sistem pratekan untuk kombinasi baja dan beton mutu tinggi.

Pada konsep kedua ini dijelaskan bahwa beton pratekan adalah pengembangan dari beton bertulang dengan mempergunakan baja mutu tinggi. Pada beton bertulang pemakaian beton dipergunakan untuk menahan gaya desak dan baja untuk menahan gaya tarik, dengan demikian kedua bahan tersebut membentuk kopel penahan guna melawan momen yang terjadi akibat beban luar. Apabila baja yang dipergunakan adalah baja mutu tinggi, maka beton disekitarnya akan retak sebelum seluruh kekuatan baja dipergunakan karena adanya ketidakcocokan di dalam regangan-regangan baja dan beton. Untuk mengatasi hal ini maka baja tersebut ditarik dan dijangkarkan pada beton terlebih dahulu, sehingga dihasilkan tegangan dan

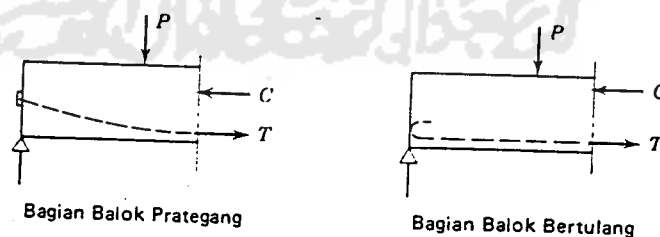


regangan yang diijinkan pada kedua bahan tersebut, tegangan dan regangan tekan pada beton serta tegangan dan regangan tarik pada baja. Kombinasi ini memungkinkan pemakaian yang aman dan ekonomis dari kedua bahan tersebut, dimana hal ini tidak dapat dicapai jika baja mutu tinggi hanya ditanamkan di dalam beton seperti beton bertulang.

Jadi pada konsep kedua ini kerja dari beton pratekan sama dengan beton bertulang yaitu akibat beban luar akan timbul momen internal pada baja dan beton. Hanya dalam beton pratekan dilakukan penarikan terlebih dahulu terhadap baja kemudian dijangkarkan agar beton terdesak.

Akibat gaya pratekan sebesar F maka pada penampang seluas A akan terjadi tegangan sebesar:

$$f = F/A \quad (2.6)$$



Gambar 2.3. Momen penahan internal pada balok beton pratekan dan beton bertulang



Sedangkan akibat beban luar akan timbul momen kopel pada baja dan beton seperti terlihat pada gambar 2.3. Berdasarkan gambar 2.3. maka tegangan yang terjadi adalah sebesar:

$$f = \mp \frac{M.y}{I} \quad (2.7)$$

dimana M adalah momen akibat gaya desak beton terhadap titik berat penampang baja, y adalah jarak serat terluar terhadap titik berat penampang beton dan I adalah momen inersia tampang beton. Jadi besarnya tegangan akhir adalah:

$$f = -\frac{F}{A} \mp \frac{M.y}{I} \quad (2.8)$$

Konsep ketiga, sistim pratekan untuk mencapai perimbangan beban.

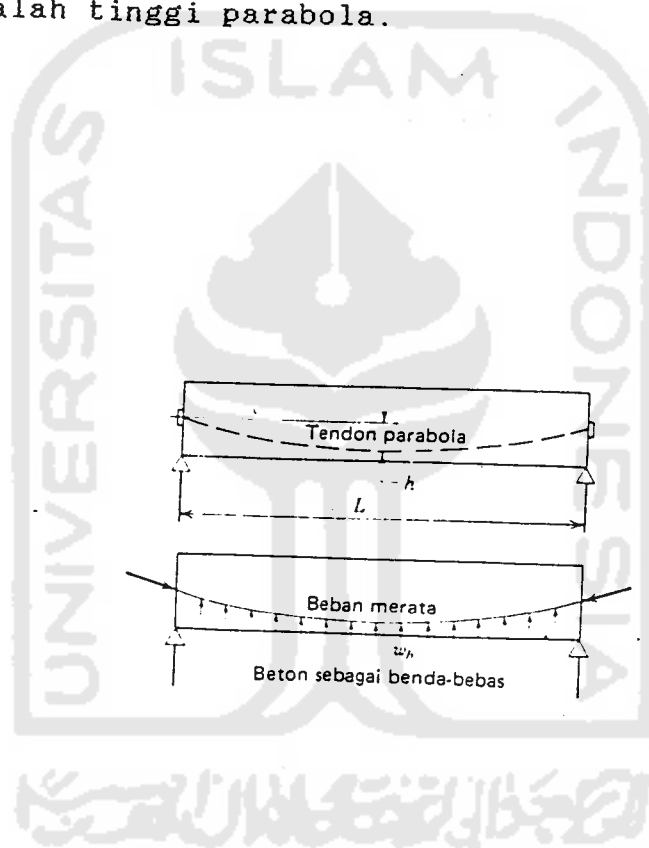
Konsep ini terutama mempergunakan pratekan sebagai usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang. Gaya yang dimaksud di sini adalah gaya ke bawah yang diakibatkan oleh berat sendiri atau beban luar, dengan gaya ke atas yang diakibatkan oleh penegangan kabel. Sehingga dengan adanya perlawanan ke atas dari kabel pratekan, diharapkan gaya ke bawah berkurang. Jika gaya kebawah berkurang, lenturan yang mengakibatkan retak-retak bagian bawah akan berkurang atau hilang sama sekali.

Seperti terlihat dari gambar 2.4. balok dengan dukungan

sederhana mempergunakan tendon berbentuk parabola. Beban yang terdistribusi ke atas secara merata adalah:

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

dimana F adalah gaya pratekan, L adalah panjang bentangan dan h adalah tinggi parabola.



Gambar 2.4. Balok pratekan dengan tendon parabola

Jadi apabila terdapat beban sebesar w ke arah bawah, maka akan terjadi pengurangan oleh w_b , sehingga besarnya beban akibat beban luar adalah $(w - w_b)$. Besarnya momen

setelah pengurangan adalah:

$$M = \frac{(w - wb)L^2}{8} \quad (2.10)$$

Tegangan yang terjadi akibat gaya pratekan dan beban luar yang telah berkurang adalah:

$$f = - \frac{F}{A} \pm \frac{M.y}{I} \quad (2.11)$$

dimana F adalah gaya pratekan, A adalah luas penampang beton, M adalah momen akibat beban yang berkurang, y adalah jarak serat terluar terhadap titik berat penampang beton dan I adalah momen inersia penampang beton.

Ketiga konsep di atas bisa dipergunakan sebagai dasar di dalam merencanakan atau menganalisa beton pratekan dengan sebaik-baiknya dan seefisien mungkin.

2.1.3. Keuntungan dan kekurangan dalam pemakaian beton pratekan

Keuntungan-keuntungan yang bisa didapat dari pemakaian beton pratekan adalah:

- pemakaian beton dan baja mutu tinggi menyebabkan batang-batang beton pratekan lebih ramping dan langsing, hal ini cocok untuk struktur dengan bentang panjang dan memikul beban yang berat. Hal ini akan berpengaruh terhadap jumlah material baja dan beton yang menjadi lebih sedikit,
- dengan adanya lendutan ke atas akibat adanya gaya pratekan, maka lendutan ke bawah akibat berat sendiri

- dan beban di atasnya bisa dikurangi,
- adanya beban yang besar bisa diatasi dengan penambahan eksentrisitas dari gaya pratekan, akan tetapi hanya dalam batas-batas tertentu sehingga berpengaruh dalam penghematan pemakaian material,
 - tidak terjadinya tegangan tarik sebagai penyebab timbulnya retak-retak yang mengakibatkan perlindungan penutup beton terhadap tulangan tidak berfungsi, bisa dihindari. Hal ini akan memberikan keuntungan untuk daerah yang agresif,
 - beton pratekan memiliki perlawanan yang meningkat terhadap gaya geser, yang disebabkan oleh pengaruh pratekan, yang mengurangi tegangan tarik. Pemakaian kabel-kabel yang dilengkungkan, khususnya dalam bentang panjang membantu mengurangi gaya geser yang timbul pada penampang, sehingga memberikan penghematan dalam pemakaian sengkang,
 - karena bahan-bahan yang dipergunakan mempunyai mutu yang tinggi, maka pemakaian bahan-bahannya lebih sedikit dibandingkan dengan beton bertulang untuk mendukung beban yang sama.

Selain keuntungan-keuntungan seperti tersebut di atas, beton pratekan mempunyai kekurangan-kekurangan sebagai berikut:

- dibutuhkannya lebih banyak bahan dan alat pembantu di dalam pembuatannya seperti pengangkuran, selubung tendon dan bahan pengisi,



- dibutuhkannya acuan yang lebih rumit bentuknya, karena bentuk daripada beton pratekan biasanya tidak persegi, hal ini berhubungan dengan pemakaian tampang yang efektif,
- pemakaian tenaga kerja yang terampil dalam pembuatannya, sehingga tidak sembarangan dalam memakai tenaga kerja.

Walaupun terdapat pembengkakan dalam biaya pembuatannya, akan tetapi terdapat suatu kondisi yang ekonomis secara keseluruhan di dalam pemakaian beton pratekan, karena turunnya beban mati mengurangi beban-beban rencana dan biaya pondasi.

2.1.4. Material

a. Beton

Pada beton pratekan, mutu beton yang dipergunakan umumnya lebih tinggi bila dibandingkan dengan beton bertulang. Rangkak dan susut pada beton pratekan harus dihindari paling tidak diperkecil, sebab apabila rangkak dan susut yang terjadi besar akan mengakibatkan kehilangan tegangan juga besar. Susut dan rangkak yang kecil hanya bisa dicapai jika mutu betonnya tinggi, sebab beton mutu tinggi mempunyai modulus elastisitas yang tinggi sehingga regangannya (akibat rangkak dan susut) juga kecil⁽²⁾⁽⁴⁾.

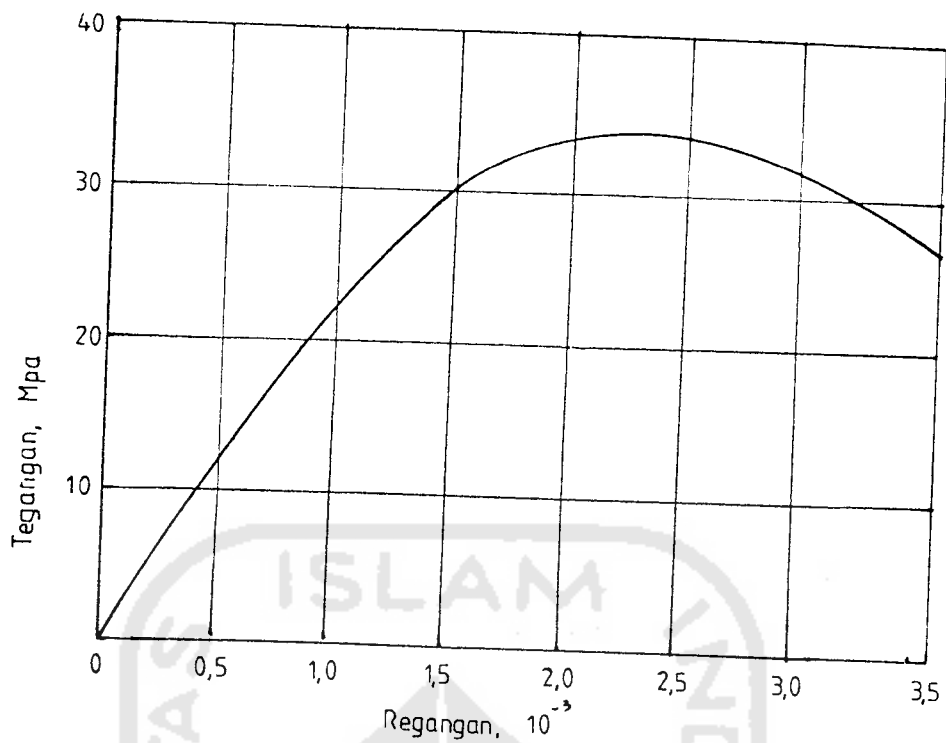
Contoh lainnya adalah beton mutu tinggi memberikan ketahanan yang tinggi terhadap tarik dan geser⁽¹⁾. Selain itu juga menjadi tuntutan pada beton pratekan yang bagian-bagiannya mengalami tegangan yang lebih tinggi

bila dibanding dengan beton bertulang.

Alat pengangkuran yang diperdagangkan untuk beton pratekan selalu direncanakan berdasarkan beton mutu tinggi, sehingga apabila digunakan beton mutu rendah maka perlu adanya alat pengangkuran khusus, sebab jika tidak beton akan runtuh pada saat diberi gaya pratekan^[2].

Dalam prakteknya, di Amerika Serikat diharuskan untuk mempergunakan kekuatan silinder beton umur 28 hari sebesar 28 - 55 Mpa. Sedangkan di Eropa ditentukan kira-kira sebesar 450 kg/cm² berdasarkan atas kubus ukuran 10, 15, atau 20 cm pada umur 28 hari^[2]. Kekuatan tekan kubus 28 hari di India berdasarkan Standar India minimum 42 N/mm² untuk batang pretension dan 35 N/mm² untuk batang postension^[1].

Pada beton pratekan, penting untuk mengetahui regangan yang terjadi karena dipergunakan untuk memperhitungkan kehilangan gaya pratekannya. Regangan yang terjadi pada beton ada dua macam, yaitu regangan elastis yang bersifat sementara dan akan hilang jika tekanan dihilangkan serta regangan plastis yang tetap dimana beton tidak kembali ke bentuk semula walaupun tekanan dihilangkan. Selain akibat tekanan regangan plastis juga diakibatkan oleh peristiwa pengeringan beton.



Gambar 2.5. Diagram tegangan regangan uji desak beton

Pada uji tekan kubus beton umur 28 hari akan didapatkan diagram tegangan regangan seperti terlihat pada gambar 2.5.

Dari gambar 2.5. bisa dilihat adanya tegangan regangan elastis dan plastis. Pada daerah elastis dari hubungan antara regangan ϵ dan tegangan σ bisa diketahui besarnya modulus elastisitas beton.

$$E_b = \text{tg } \alpha = \sigma / \epsilon$$

Modulus elastisitas dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu kekuatan beton, umur beton dan sifat-sifat agregat serta semen. Modulus elastisitas ini bervariasi terhadap kecepatan pembebanan dan terhadap jenis contoh beton apakah silinder maupun balok. Jadi hampir tidak mungkin untuk memperkirakan secara tepat nilai dari modulus

elastisitas beton^[2].

Di bawah ini diberikan rumus guna menghitung besarnya modulus elastisitas:

a. Menurut PBBI 1971 N. 1-2:

- untuk pembebanan tetap,

$$E = 6400 \sqrt{\sigma_{bk'}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

- untuk pembebanan sementara,

$$E = 9600 \sqrt{\sigma_{bk'}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

b. Menurut Standar India^[1]:

$$- 5688(f_{cu})^{1/2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

c. Sesuai dengan Komite Beton Eropa (CEB)^[1]:

$$E = 6000(f_{cu})^{1/2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

d. Menurut American Concrete Institute (ACI)^[2]:

$$E = \omega^{1.5} \cdot 0,043 \sqrt{f_{c'}} \text{ (Mpa)}$$

dimana ω adalah berat jenis air dan bervariasi antara 1450 - 2500 kg/cm². Untuk beton normal persamaan disederhanakan menjadi:

$$E = 4730 \sqrt{f_{c'}} \text{ (Mpa)}$$

e. Rumus yang diusulkan oleh Jensen^[2]:

$$E = \frac{41400}{1 + 14/f_{c'}} \text{ (Mpa)}$$

f. Rumus yang diusulkan oleh Hognested^[2]:

$$E = 12420 + 460f_{c'} \text{ (Mpa)}$$

g. Peraturan Inggris memberikan nilai modulus elastisitas seperti terlihat pada tabel 2.1.^[1]

Tabel 2.1. Nilai modulus elastisitas beton

Kekuatan kubus pada usia atau tahap yang tepat yang ditinjau	Modulus elastisitas beton
N/mm^2	kN/mm^2
20	25
25	26
30	28
40	31
50	34
60	36

Dari gambar 2.5. bisa dilihat bahwa setelah terjadi regangan elastis akan diikuti oleh regangan plastis, dimana apabila beban dihilangkan beton tidak kembali seperti semula. Regangan plastis yang diakibatkan oleh tekanan disebut dengan rangkak.

Rangkak pada beton berlangsung terus untuk waktu yang sangat lama dan cenderung menuju suatu nilai limit setelah suatu waktu yang tak terhingga, meskipun kecepatan rangkak makin lama makin berkurang^[1].

Selain terjadinya regangan yang diakibatkan oleh tekanan secara terus menerus, maka pada beton juga terjadi regangan yang diakibatkan oleh peristiwa pengeringan dimana air pada pori-pori menguap. Besarnya regangan susut ini dipengaruhi oleh waktu (umur beton) serta kelembaban udara di sekeliling beton^[2].

Susut beton dalam batang-batang pretension disebabkan oleh kehilangan kelembaban secara bertahap

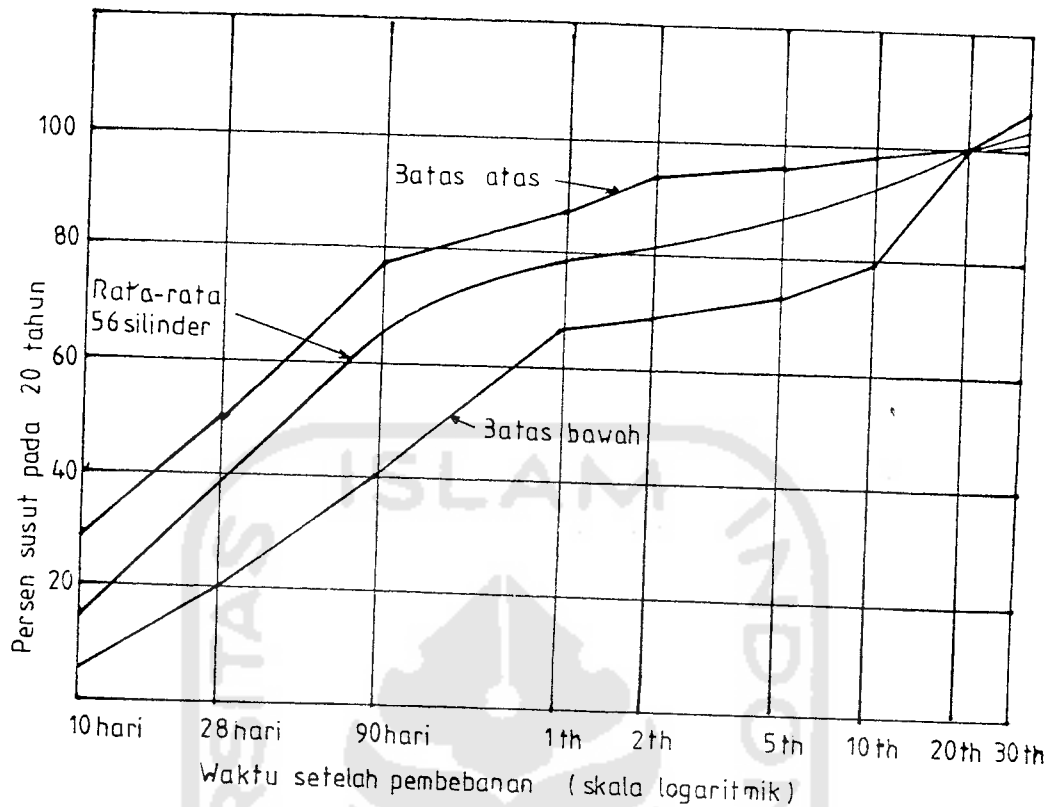


yang mengakibatkan perubahan volume. Susut pengeringan tergantung kepada tipe dan kualitas agregat, kelembaban relatif, perbandingan air dengan semen dalam campuran dan waktu pada keadaan udara terbuka. Susut juga tergantung kepada derajat pengerasan beton pada permulaan pengeringan^[1].

Karena susut pada beton sebanding dengan jumlah air yang terdapat dalam campuran, maka jika dikehendaki susut minimum, perbandingan air dengan semen dalam porsi adukan harus dibuat minimum. Agregat berukuran lebih besar dengan gradasi yang baik dan pori-pori minimum membutuhkan jumlah adukan semen yang lebih sedikit dan susut akan lebih kecil^[2].

Tingkat serta banyaknya susut dari batang-batang struktur dalam kondisi biasa akan sangat banyak tergantung pada perbandingan luas permukaan terhadap volume batang, oleh karena pertukaran kelembaban antara beton dengan udara harus terjadi lewat permukaan^[1].

Nilai tegangan susut dipengaruhi oleh waktu setelah perawatan (dinyatakan dalam hari), kadar air, kelembaban udara dimana beton dibuat, serta perbandingan antara volume dengan luas permukaan beton^[9]. Gambar 2.6. memperlihatkan hubungan regangan susut (dinyatakan dalam persen) dengan waktu.



Gambar 2.6. Hubungan regangan susut dengan waktu

Tegangan izin beton, sesuai dengan kondisi gaya pratekan dan tegangan beton pada tahap beban kerja menurut SK SNI T-15-1991-03, tidak boleh melampaui nilai berikut^[5]:

1. tegangan beton sesaat sesudah pemindahan gaya pratekan (sebelum kehilangan tegangan yang merupakan fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:
 - a. serat terluar mengalami tegangan tekan $0,6 f_{ci}$
 - b. serat terluar mengalami tegangan tarik kecuali seperti yang diizinkan dalam (c) $\sqrt{f'_{ci}/4}$
 - c. serat terluar pada ujung komponen struktur yang didukung sederhana mengalami tegangan tarik $\sqrt{f'_{ci}/4}$
- Bila tegangan tarik terhitung melampaui nilai tersebut di atas, maka harus dipasang tulangan tambahan (non pratekan atau pratekan) dalam daerah tarik untuk memikul gaya tarik total dalam beton, yang dihitung berdasarkan asumsi suatu penampang utuh.
2. tegangan beton pada tingkat beban kerja (sesudah memperhitungkan semua kehilangan pratekan yang mungkin terjadi) tidak boleh melampaui nilai berikut:

- a. serat terluar tegangan tekan
- b. tegangan pada serat terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan
- c. tegangan pada serat terluar dalam daerah tarik yang pada awalnya mengalami tekan dari komponen (kecuali pada sistim plat dua arah), dimana analisis yang didasarkan pada transformasi penampang retak dan hubungan bilinier dari momen lendut menunjukkan bahwa lendutan sesaat dan lendutang jangka panjang memenuhi persyaratan ayat 3.2.5 butir 4 dan dimana persyaratan penutup beton memenuhi ayat 3.16.7 butir 3 sub butir 2
3. tegangan izin beton yang tersebut di atas boleh dilampaui bila dapat ditunjukkan dengan pengujian atau analisis bahwa kemampuan strukturnya tidak berkurang.

$$0,6f'_{ci}$$

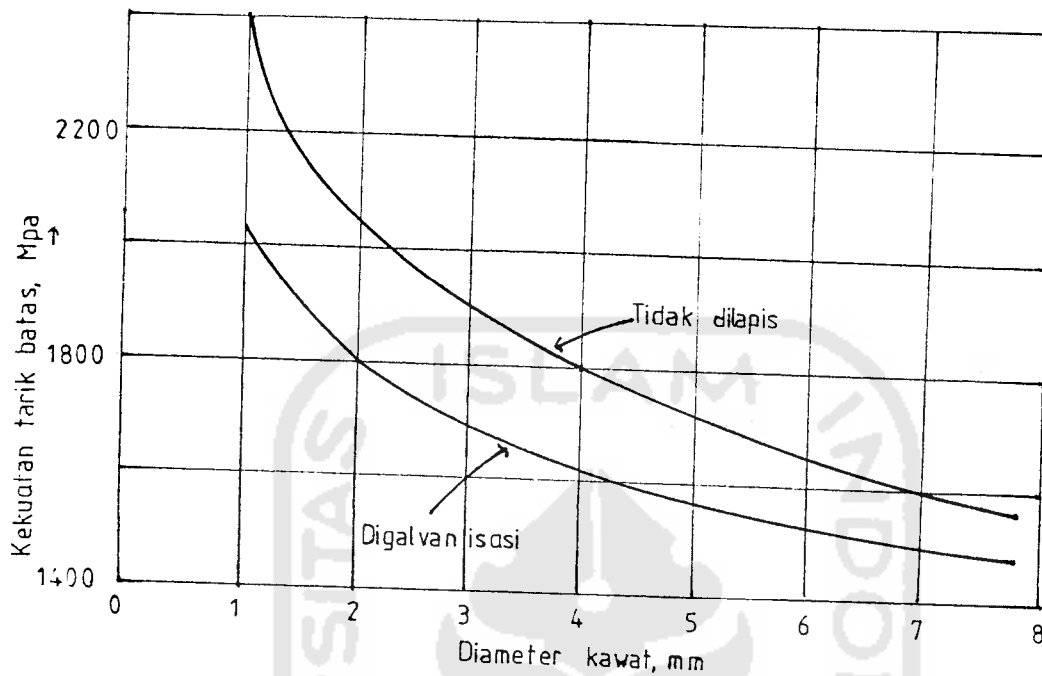
$$\sqrt{f'_{c}/2}$$

$$\sqrt{f'_{c}}$$

b. Baja

Baja yang diperlukan pada beton pratekan mutlak mempunyai mutu tinggi sehingga bisa didapatkan tegangan tarik yang besar sesuai dengan kebutuhan. Selain itu perpanjangan baja maksimal hanya didapat pada baja dengan mutu tinggi.

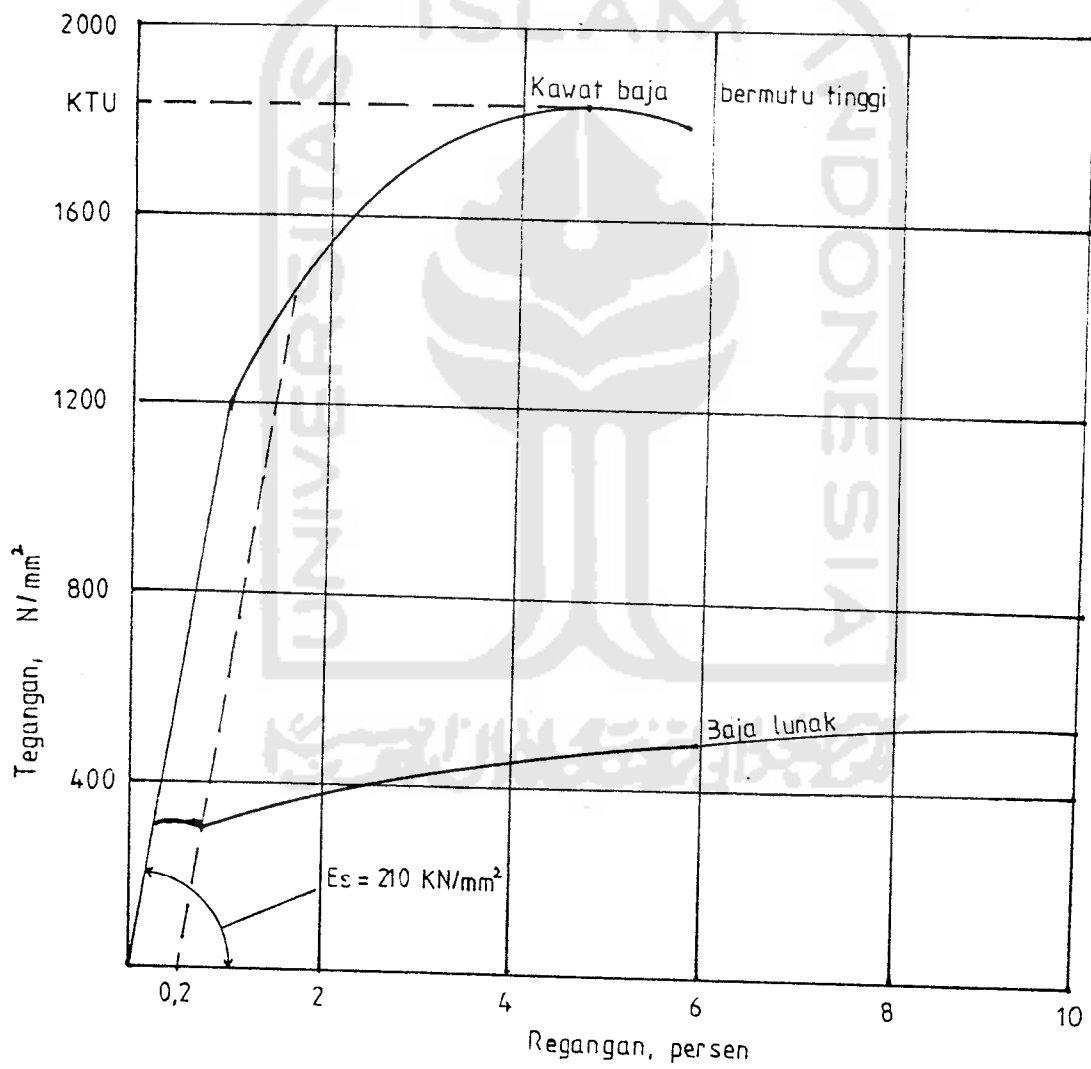
Kekuatan tarik ultimit baja mutu tinggi berubah menurut diameter dari kawat. Kekuatannya agak kurang untuk kawat dengan diameter lebih besar dari pada yang mempunyai diameter kecil⁽¹⁾. Gambar 2.7. menunjukkan perubahan kekuatan terhadap diameter kawat.



Gambar 2.7. Pengaruh diameter kawat terhadap kekuatannya

Karakteristik tegangan regangan dari kawat baja mutu tinggi diperlihatkan pada gambar 2.8. Tegangan karakteristik yang memberikan regangan tetap $0,2\%$ pada kawat baja mutu tinggi untuk pekerjaan pratekan tidak kurang dari 80% kekuatan tarik ultimit minimum. Suatu karakteristik penting dari baja yang dipakai didalam pratekan adalah plastis baja pada tegangan regangan yang dekat dengan tegangan ultimit, hal ini penting agar terdapat peringatan sebelumnya apabila mencapai gejala kerusakan^[1].

KTU = Kuat Tarik Ultimit



Gambar 2.8. Diagram tegangan regangan baja mutu tinggi

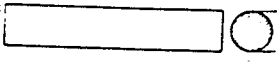




Tegangan baja yang diperkenankan oleh peraturan India, Inggris dan Amerika diperlihatkan pada tabel 2.2.

Apabila suatu kawat baja mutu tinggi ditegangkan dan tetap dipertahankan pada suatu regangan yang konstan, maka gaya awal dalam kawat tidak akan konstan tetapi berkurang dengan waktu. Pengurangan tegangan dalam baja pada regangan konstan dinyatakan sebagai relaksasi ("relaxation")⁽⁴⁾. Hal ini penting untuk diperhatikan dimana akan berhubungan dengan peristiwa kehilangan tegangan.

Baja mutu tinggi yang dipergunakan pada sistem pratekan biasanya berbentuk kawat baja ("wire"), untaian kawat baja ("strand") dan batang baja ("bar").




Kawat baja ("wire") adalah tulangan yang mempunyai penampang padat dengan diameter yang kecil. Di benua Eropa, kawat polos dengan diameter 2 mm dan 3 mm (kadang-kadang 2,5 mm) dan kawat ulir bergaris tengah 4 mm dan 5 mm. Di Inggris, no. 2 mempunyai diameter 7 mm dan no. 6 mempunyai diameter 5 mm. Di Jerman, kawat ulir dengan penampang berbentuk oval mempunyai luas 20 mm^2 , 30 mm^2 , 35 mm^2 dan 40 mm^2 serta mempunyai diameter besar 11 mm dan diameter kecil 4,5 mm. Di Amerika Serikat, no 2 mempunyai diameter 6,67 mm dan no. 6 mempunyai diameter 4,88 mm. Kekuatan tarik minimum kawat baja diperlihatkan pada tabel 2.3.

Jenis	Diameter		Bentuk
	in	mm	
Kawat polos	2,0 - 9,0	0,008 - 0,360	
Kawat berulir	5,0 - 7,0	0,200 - 0,276	
Kawat berulir	7,0 - 13,0	0,276 - 0,512	

Gambar 2.9. Gambar kawat baja ("wire")

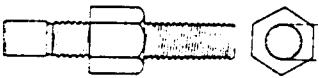
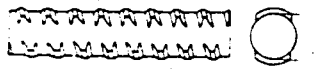
Untaian kawat ("strand") adalah kawat baja yang terdiri dari untaian beberapa buah "wire" dan digabung dengan cara dipuntir berjumlah 2, 3, 7 dan 19 "wire". Untaian kawat yang biasa diipergunakan adalah derajat 1720 Mpa (250 Ksi) dan derajat 1860 Mpa (270 Ksi), dimana kata derajat menunjukkan tegangan putus minimum yang dijamin. Sifat-sifat daripada untaian 7 kawat diperlihatkan pada tabel 2.3.



Jenis	Diameter		Bentuk
	in	mm	
2 kawat yang dipilin	2.9-2	0.114-2	
strand 7 kawat	6.2-15.2	0.250-0.600	
strand 19 kawat	17.8-21.8	0.700-0.860	

Gambar 2.10. Gambar untaian kawat ("strand")

Batang baja ("bar") adalah tulangan yang mempunyai diameter lebih besar dibandingkan dengan diameter kawat ("wire"). Batang baja yang biasa dipergunakan adalah batang baja polos dengan diameter antara 19 mm - 35 mm dan batang baja berulir dengan diameter antara 15 mm - 35 mm. Kekuatan tarik minimum batang baja diperlihatkan pada tabel 2.4. Sedangkan tegangan leleh minimum untuk masing-masing bentuk diperlihatkan pada tabel 2.5.

Jenis	Diameter		Bentuk
	in	mm	
baja ulir	9.2-32.0	0.362-1.260	
baja galur	23.0-32.0	0.906-1.260	

Gambar 2.11. Gambar batang baja ("bar")

Tabel 2.2. Tegangan baja mutu tinggi yang diijinkan

	80% kekuatan awal	80% kekuatan tarik	dapat dinaikan sampai
Pada awal penarikan awal	80% kekuatan awal tarik ultimit	80% kekuatan tarik ultimit tetapi lebih besar daripada nilai maksimum yang disarankan oleh pabrikan	70% kekuatan karakteristik tetapi dapat dinaikan sampai 80% asalkan diberikan tambahan pertimbangan terhadap karakteristik tegangan tegangan dari tendon serta kehilangan gesekan.
Segera sesudah		70% kekuatan tarik ultimit	
Setelah memperhitungkan semua kehilangan	60% kekuatan tarik ultimit		

Keterangan :

IS = Peraturan India

ACI = Peraturan Amerika

CP = Peraturan Inggris



Tabel 2.3. Sifat Kawat dan 7-kawat

Type	Derajat	Diameter		Luas		fu	
		in	mm	in ²	mm ²	Ksi	Mpa
Kawat	WA, BA	0.192	4.88	0.0289	18.7	250	1725
	WA	0.196	4.98	0.0302	19.4	250	1752
	BA	0.193	4.98	0.0302	19.4	240	1655
	WA, BA	0.25	6.35	0.0491	31.6	240	1655
	WA	0.276	7.01	0.0598	38.7	235	1622
7-Kawat	derajat 250	0.25	6.35	0.036	23.22	250	1725
		0.313	7.94	0.058	37.42		
		0.375	9.35	0.080	51.61		
		0.438	11.11	0.108	69.68		
		0.500	12.54	0.144	92.90		
	derajat 270	0.600	15.24	0.213	139.35	270	1860
		0.375	9.53	0.085	54.84		
		0.438	11.11	0.115	74.19		
		0.500	12.56	0.153	98.71		
		0.563	14.29	0.192	123.87		
	0.600	15.24	0.216	139.35			

Keterangan :

WA = Wedge Anchorage, digunakan pada ujung-ujung yang diangkur dengan biji

BA = Button Anchorage, digunakan untuk tujuan pengukuran



Tabel 2.4. Sifat batang baja

Macam	Derajat	Diameter		Luas		fu	
		in	mm	in ²	mm ²	Ksi	Mpa
Batang baja Paduan	145	0.750	19.05	0.442	283.9	145	1000
		0.875	22.22	0.601	387.1		
		1.0	25.40	0.785	503.2		
		1.125	28.57	0.994	638.7		
		1.250	31.75	1.227	793.5		
		1.376	34.92	1.485	954.8		
	250	0.750	19.05	0.442	283.9	160	1104
		0.875	22.22	0.601	387.1		
		1.0	25.40	0.785	503.2		
		1.125	28.57	0.994	638.7		
		1.25	31.75	1.227	793.5		
		1.375	34.72	1.485	954.8		
Batang baja terdefor masi		0.625	15.87	0.280	180.6	157	1083
		1.0	25.4	0.852	548.4	150	1035
		1.0	25.4	0.852	548.4	160	1104
		1.25	31.75	1.295	835.5	150	1035
		1.25	31.75	1.295	835.5	160	1104
		1.50	34.92	1.630	1051.6	150	1035

Tabel 2.5. Tegangan leleh kawat, kumpulan kawat dan baja

Jenis Tendon	Spesifikasi ASTM		Modulus Elastis	
	Tegangan leleh	Regangan ultimit	Ksi	Mpa
kawat	$f_y = 0.85 f_u$ pada $\epsilon_y = 0.010$	$\epsilon_u = 0.040$	29000	200000
Kumpulan kawat	$f_y = 0.85 f_u$ pada $\epsilon_y = 0.010$	$\epsilon_u = 0.040$	27000	186000
Baja	$f_y = 0.85 f_u$ pada $\epsilon_y = 0.0070$ $f_y = 0.80 f_u$ pada $\epsilon_y = 0.070$	$\epsilon_u = 0.040$	28000	193000

Tegangan tarik dalam tendon pratekan menurut SK SNI T-15-1991-03 tidak boleh melampaui nilai berikut:

- a. akibat gaya penjangkaran tendon tetapi tidak lebih besar dari $0,85f_{pu}$ atau nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat tendon pratekan atau jangkar $0,94f_{py}$
- b. sesaat setelah pemindahan gaya pratekan tetapi tidak boleh lebih besar dari $0,74f_{pu}$ $0,82f_{py}$
- c. tendon pasca tarik, pada daerah jangkar dan sambungan sesaat setelah penjangkaran tendon $0,70f_{py}$

2.1.5. Cara penegangan

Cara pembuatan beton pratekan adalah dengan memberikan tekanan pada beton dengan perantara tendon yang ditegangkan. Tekanan dapat diperoleh dari tendon baik oleh peristiwa lekatan maupun pengangkuran. Ada dua cara penegangan tendon yang dilakukan yaitu cara "pretension" dan cara "postension".

Pada sistem pretension, tendon ditegangkan terlebih dahulu kemudian beton dicor sesuai dengan bentuk serta ukuran yang diinginkan. Apabila beton sudah mencapai umur 28 hari, maka tendon dipotong pada ujung-ujung balok beton. Pada sistim "pretension" ini, tekanan yang didapat oleh beton diperoleh melalui peristiwa lekatan antara tendon dengan beton. Oleh karena itu perlu diperhatikan terjadinya lekatan sepenuhnya sepanjang batang^{[1][2][3]}.

Sedangkan sistim "postension" dilakukan dengan mencetak beton terlebih dahulu sesuai dengan bentuk dan ukurannya serta memberikan saluran atau alur guna penempatan tendonnya. Apabila beton sudah mencapai



kekuatan pada umur 28 hari, maka tendon dimasukkan ke dalam saluran yang kemudian ditegangkan. Tekanan yang didapat pada sistim "postension" ini didapat dengan melakukan pengangkuran tendon pada ujung-ujung balok beton⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

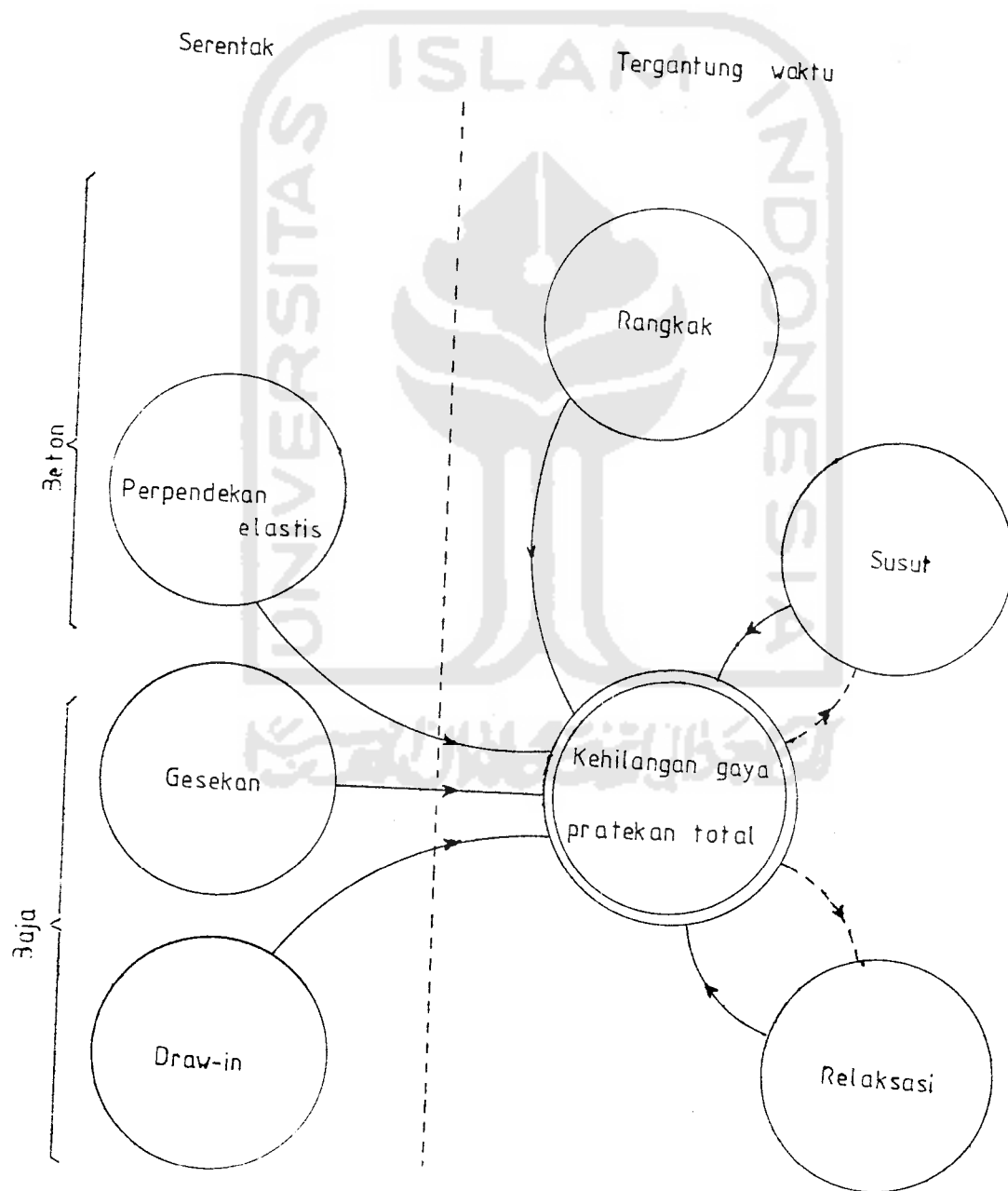
2.2. Kehilangan tegangan

Pemberian tekanan pada beton pratekan didapat dengan mempergunakan tendon. Terlebih dahulu tendon ditarik, apabila telah tercapai gaya tarik seperti yang direncanakan, maka tendon dilepas pada ujung-ujung baloknya. Dengan peristiwa pengangkuran pada sistem "postension" dan peristiwa pelekatan pada sistem "pretension", maka tekanan pada beton bisa didapat. Pada dasarnya tekanan yang diinginkan sama besarnya dengan gaya yang digunakan untuk menarik tendon, akan tetapi kenyataannya gaya tekan yang didapat lebih kecil. Hal ini terjadi karena peristiwa pengurangan terhadap gaya tekan tersebut, pengurangan ini menyebabkan tegangan yang terjadi berkurang.

Ada beberapa penyebab terjadinya kehilangan tegangan pada beton pratekan, yang bisa dibagi dalam dua kelompok, yaitu kehilangan tegangan sesaat, yang diakibatkan oleh deformasi elastis beton, gesekan antara tendon dengan beton, slip pada pengangkuran; dan kehilangan tegangan yang dipengaruhi oleh waktu yang diakibatkan oleh



peristiwa susut dan rangkak pada beton serta relaksasi pada baja⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾. Hal ini seperti terlihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Diagram kehilangan tegangan

2.2.1. Deformasi elastis beton

Kehilangan tegangan ini diakibatkan karena adanya perpendekan baja yang terjadi bersamaan dengan terjadinya perpendekan pada beton sebagai akibat adanya gaya pratekan. Perpendekan pada beton ϵ_c bisa didapat dari persamaan sebagai berikut⁽²⁾⁽¹⁰⁾:

$$\epsilon_c = f_c/E_c \quad (2.12)$$

dimana f_c adalah tegangan pada beton akibat gaya pratekan, berat sendiri, dan beban luar, sedangkan E_c adalah modulus elastisitas beton, dan besarnya pengurangan tegangan pada baja Δf adalah⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾:

$$\Delta f = \epsilon_s \cdot E_s \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.13) ϵ_s adalah perpendekan yang terjadi pada baja dan E_s adalah modulus elatisitas baja. Besarnya perpendekan yang terjadi pada beton ϵ_c sama dengan besarnya perpendekan yang terjadi pada baja ϵ_s , sehingga:

$$\epsilon_c = \epsilon_s \quad (2.14)$$

dan besarnya ϵ_s pada persamaan (2.13) bisa diganti dengan besarnya ϵ_c pada persamaan (2.12), yang akhirnya didapatkan:

$$\begin{aligned}
\Delta f &= \epsilon_s \cdot E_s \\
&= \epsilon_c \cdot E_s \\
&= \frac{f_c}{E_c} \cdot E_s \\
&= f_c \cdot n \\
f_c &= \frac{\Delta f}{n} \tag{2.15}
\end{aligned}$$

Besarnya f_c bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
f_c &= \frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e \cdot e \cdot y}{I_c} - F \\
&= P_e \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e \cdot y}{I_c} \right) - F \tag{2.16}
\end{aligned}$$

dimana P_e adalah besarnya gaya pratekan efektif yang bekerja pada beton setelah terjadi pengurangan sebagai akibat terjadinya deformasi elastis pada beton⁽⁶⁾.

$$P_e = A_{st} (f_{pi} - \Delta f) \tag{2.17}$$

Dari persamaan (2.17) tersebut, f_{pi} adalah tegangan yang terjadi sebelum terjadinya pengurangan akibat deformasi elatis beton, dan Δf adalah besarnya pengurangan tegangan tersebut. Apabila persamaan (2.15) dan (2.17) dimasukkan ke dalam persamaan (2.16) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta f}{n} = \frac{A_{st} (f_{pi} - \Delta f) \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e \cdot y}{I} \right) - F}{A_c} \tag{2.18}$$

Untuk menyederhanakan persamaan (2.18) tersebut kita misalkan:

$$\frac{A_{st}}{A_c} \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e \cdot y}{I} \right) = K \quad (2.19)$$

Sehingga apabila kita masukkan harga K ke dalam persamaan (2.15) akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta f/n &= (f_{pi} - \Delta f) K - F \\ \Delta f &= K \cdot n \cdot f_{pi} - n \cdot K \cdot \Delta f - n \cdot F \\ \Delta f + n \cdot K \cdot \Delta f &= K \cdot n \cdot f_{pi} - n \cdot F \\ \Delta f (1 + n \cdot K) &= K \cdot n \cdot f_{pi} - n \cdot F \\ \Delta f &= \frac{K \cdot n \cdot f_{pi}}{1 + n} - n \cdot F \end{aligned} \quad (2.20)$$

dimana n adalah perbandingan modulus elastisitas baja dan beton. Dengan mempergunakan persamaan (2.20) dapat diperoleh besarnya kehilangan tegangan pada batang pretension akibat deformasi elastisitas beton. Sedangkan pada batang postension tidak terjadi kehilangan tegangan pada baja bila hanya digunakan satu buah tendon, karena gaya pada kabel dihitung setelah terjadi perpendekan elastis pada tendon. Lain masalahnya jika tendon yang dipakai lebih dari satu dan penegangan dilakukan tidak bersamaan. Sehingga tendon yang pertama dipengaruhi oleh tendon yang kedua dan seterusnya, karena itu tendon yang pertama akan mengalami kehilangan tegangan paling besar. Sedangkan tendon yang terakhir tidak mengalami kehilangan



tegangan.

Guna memperhitungkan kehilangan tegangan, diambil 50% dari kehilangan tegangan pada tendon yang pertama⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾.

Kehilangan tegangan yang terjadi pada batang postension adalah:

$$\Delta f = \frac{K.n.f_{pi}}{2(1+n)} \quad (2.21)$$

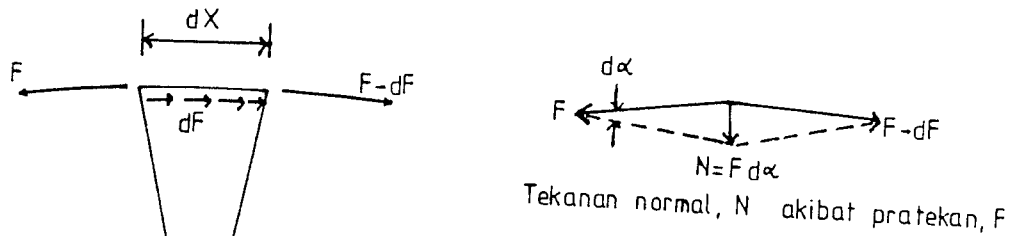
2.2.2. Gesekan

Pada peristiwa penegangan kabel-kabel beton pratekan, baik yang lurus maupun yang melengkung, akan terjadi gesekan terhadap dinding saluran atau kisi-kisi penyekatnya yang akan mengakibatkan pengurangan terhadap tegangan yang terjadi. Besarnya kehilangan tegangan tersebut dipengaruhi oleh koefisien gesekan antara kabel dengan dinding saluran⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾.

Kita tinjau tendon pratekan sepanjang dx yang titik beratnya mengikuti busur lingkaran dengan jari-jari R seperti terlihat pada gambar 2.13. Maka perubahan sudut yang terjadi akibat lengkungan sepanjang dx adalah⁽²⁾:

$$d\alpha = dx/R \quad (2.22)$$





Kehilangan gaya pratekan akibat gesekan, dF

Gambar 2.13. Kehilangan gaya pratekan akibat gesekan Tekanan tegak lurus yang diakibatkan oleh gaya P dan membentuk sudut $d\alpha$, sebesar⁽²⁾:

$$\begin{aligned}
 N &= P \cdot d\alpha \\
 &= P \cdot dx/R
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Pengurangan terhadap gaya pratekan sebesar dP akibat gesekan di sekeliling dx didapat dengan mengalikan tekanan N dengan koefisien gesekan μ , seperti terlihat pada persamaan berikut⁽²⁾:

$$\begin{aligned}
 dP &= \mu \cdot N \\
 &= \mu \cdot P \cdot dx
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Besarnya μ diperlihatkan pada tabel 2.6.

Selain terjadi gesekan antara kabel dengan saluran juga akan terjadi kehilangan tegangan yang disebabkan oleh bentuk kelengkungan tendon⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾. Besarnya kehilangan tegangan ini dipengaruhi oleh koefisien "wobble" K, dan besarnya seperti terlihat pada tabel 2.6. Kita tinjau tendon sepanjang dx, maka kehilangan terhadap gaya pratekan P adalah⁽²⁾⁽⁷⁾:

$$dP = K.P.dx \quad (2.25)$$

Dari persamaan (2.24) dan (2.25) akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} dP &= K.P.dx + \mu.P.d\alpha \\ &= P(K.dx + \mu.d\alpha) \\ dP/P &= K.dx + \mu.d\alpha \end{aligned} \quad (2.26)$$

Apabila persamaan (2.26) diintegrasikan maka akan diperoleh persamaan:

$$\int_{P_x}^{P_s} dP/P = \int_0^l K.dx + \int_0^\alpha \mu.d\alpha$$

$$\ln \frac{P_s}{P_x} = K.l + \mu.\alpha \quad (2.27)$$

Tabel 2.6. Koefisien "Wobble" K dan Koefisien kelengkungan μ

Tipe Tendon	Koefisien "Wobble" K tiap meter	Koefisien Kelengkungan μ
<p>Tendon pada selubung logam fleksibel</p> <p>Tendon kawat</p> <p>Strand dengan untaian 7-kawat</p> <p>Batang baja mutu tinggi</p>	<p>0.0033-0.0049</p> <p>0.0016-0.0066</p> <p>0.0033-0.0020</p>	<p>0.15 - 0.25</p> <p>0.15 - 0.25</p> <p>0.80 - 0.30</p>
<p>Tendon pada selubung logam kaku</p> <p>Tendon kawat</p> <p>Strand dengan untaian 7-kawat</p>	<p>0.0007</p>	<p>0.15 - 0.25</p>
<p>Tendon yang diminyaki terlebih dahulu</p> <p>Tendon kawat dan Strand dengan untaian 7-kawat</p>	<p>0.001-0.0066</p>	<p>0.05 - 0.15</p>
<p>Tendon yang diberi lapisan mastik</p> <p>Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat</p>	<p>0.0033-0.0066</p>	<p>0.05 - 0.15</p>

Dari persamaan (2.27) P_s adalah gaya tarik pada tendon dan P_x adalah tekanan yang terjadi pada tendon setelah terjadi pengurangan akibat peristiwa gesekan. Dari persamaan (2.27) bisa didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$P_s = P_x \cdot e^{(kl + \mu \omega)} \quad (2.28)$$

atau

$$P_x = P_s \cdot e^{-(kl + \mu \omega)} \quad (2.29)$$

Besarnya kehilangan gaya pratekan ΔP adalah selisih antara besarnya gaya tarik pada tendon P_s , dengan tekanan pada tendon setelah terjadi pengurangan P_x , yaitu:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_s - P_x \\ &= P_s - P_s \cdot e^{-(kl + \mu \omega)} \\ &= P_s(1 - e^{-(kl + \mu \omega)}) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Apabila kehilangan gaya pratekan yang tersebut pada persamaan (2.30) dibagi dengan luasnya tendon A_s , maka akan didapatkan besarnya kehilangan tegangan yang terjadi, yaitu:

$$\Delta f = f(1 - e^{-(kl + \mu \omega)}) \quad (2.31)$$

dimana f adalah besarnya tegangan tarik yang terjadi pada tendon, l adalah panjang bentangan dan ω adalah



lengkungan tendon. Berdasarkan ACI, apabila besarnya $(k_l + \mu\alpha) \leq 0,3$, maka besarnya kehilangan gaya pratekan bisa didapatkan dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_s - P_x = K.P_x.l + \mu.P_x.\alpha$$

$$P_s = P_x(1 + K.l + \mu.\alpha)$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_s - P_x \\ &= P_s(K.l + \mu.\alpha) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Jika besarnya kehilangan gaya pratekan pada persamaan (2.32) dibagi dengan luasan tendon, maka akan diperoleh besarnya kehilangan tegangan yang terjadi, yaitu:

$$\Delta f = f(K.L + \mu\alpha) \quad (2.33)$$

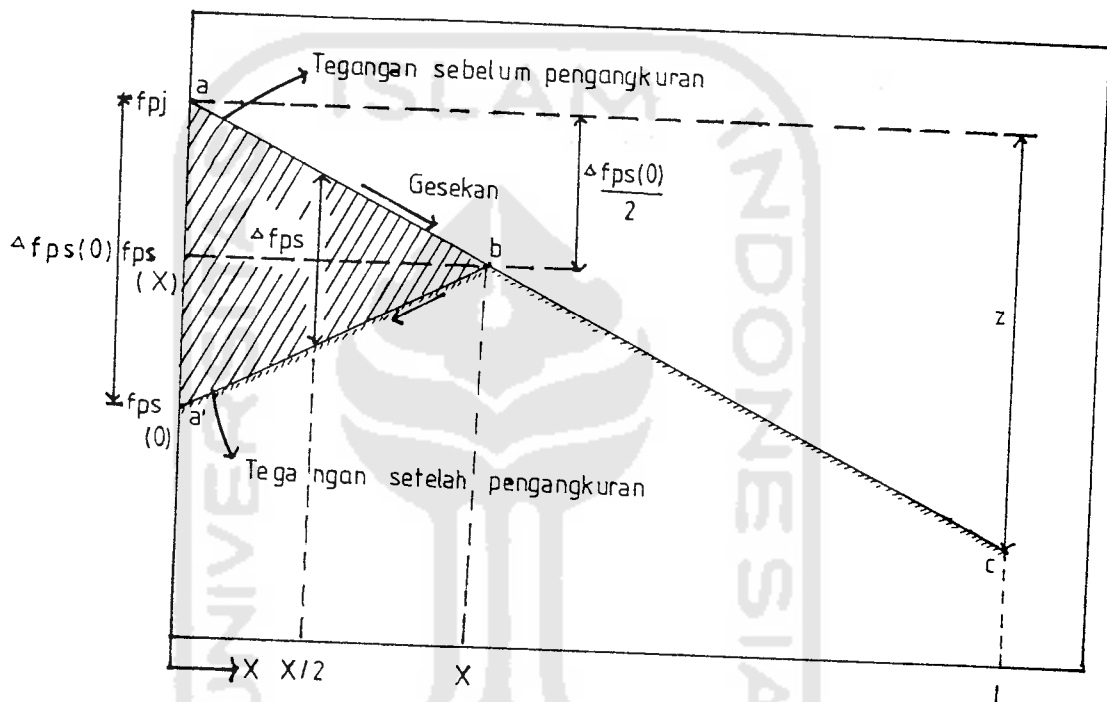
Kehilangan tegangan akibat peristiwa gesekan ini terjadi pada batang postension.

2.2.3. Slip pada pengankuran (Draw-in)

Guna mendapatkan tekanan pada tendon salah satu cara yang digunakan adalah dengan peristiwa pengankuran terhadap tendon pada ujung-ujung balok setelah ditarik dengan mempergunakan gaya tarik yang direncanakan. Peristiwa pengankuran ini terjadi pada batang "postension" dan dilakukan dengan menjepit tendon agar mempunyai panjang yang tetap, sehingga gaya yang



diinginkan tidak berubah. Pada saat peristiwa penjepitan terhadap tendon dilakukan, maka akan terjadi penggelinciran sesaat sebelum tendon bisa dijepit secara kokoh. Adanya peristiwa penggelinciran ini mengakibatkan perpendekan pada baja, yang menyebabkan gaya desak pada beton sesaat setelah pengangkuran berkurang besarnya.



Gambar 2.14. Tegangan pada ujung balok

Dari gambar 2.14. kita anggap tegangan pada tendon sebelum diangkurkan digambarkan oleh garis lurus ac , maka jika terjadi penggelinciran sebesar δ pada saat pengangkuran, akan terjadi penurunan tegangan pada ujung balok. Tegangan pada ujung balok akan mengalami pengurangan, yang besarnya turun secara perlahan-lahan hingga suatu jarak X dan pengaruh pengurangan tegangan akibat "draw-in" tidak terjadi lagi, sehingga besarnya



tegangan sebelum dan sesudah pengangkuran sama⁽⁹⁾.

Kemiringan garis ab dan a'b menggambarkan besarnya tegangan pada tendon sebelum dan sesudah pengangkuran dari gambar 2.14. tersebut, besarnya kehilangan tegangan pada ujung balok Δf_{ps} , adalah:

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps}(\emptyset) &= f_{pj} - f_{ps}(\emptyset) \\ &= 2[f_{pj} - f_{ps}(X)] \\ \frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)}{2} &= f_{pj} - f_{ps}(X) \end{aligned} \quad (2.34)$$

dimana $f_{ps}(X)$ adalah tegangan sejauh X dari ujung balok, dan f_{pj} adalah besarnya tegangan awal pada tendon. Untuk $X = \emptyset$, atau tepat pada ujung balok, kehilangan tegangan dinyatakan dengan $\Delta f_{ps}(\emptyset)$ dan ketika sejauh X dari ujung balok, maka peristiwa kehilangan tegangan tidak terjadi lagi. Karena terjadi peristiwa gesekan, maka besarnya tegangan pada tendon sejauh X pada ujung balok bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut:

$$f_{ps}(X) = f_{pj} \cdot e^{-\lambda X} \quad (2.35)$$

dan

$$\lambda X = \mu \alpha + KX$$

dimana μ adalah koefisien gesekan, α adalah sudut kelengkungan tendon dan K adalah koefisien wobble. Jika persamaan (2.35) dimasukkan ke dalam persamaan (2.34), maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:



$$\begin{aligned}\frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)}{2} &= f_{pj} - f_{pj} \cdot e^{-\lambda X} \\ &= f_{pj}(1 - e^{-\lambda X})\end{aligned}\quad (2.36)$$

dengan mempergunakan ekspansi Taylor, maka didapatkan persamaan:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)}{2} &= f_{pj}[1 - (1 - \lambda X)] \\ &= f_{pj} \cdot \lambda X\end{aligned}\quad (2.37)$$

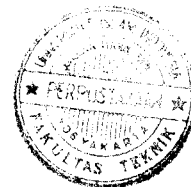
kehilangan tegangan akibat pergeseran angker adalah:

$$\begin{aligned}\Delta f_{ps}(\emptyset) &= 2 \cdot E_{ps} \cdot \delta / X \\ \frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)}{2} &= E_{ps} \cdot \delta / X \\ f_{pj} \cdot \lambda X &= E_{ps} \cdot \delta / X \\ X^2 &= \frac{E_{ps} \cdot \delta}{f_{pj} \cdot \lambda} \\ X &= \sqrt{\frac{E_{ps} \cdot \delta}{f_{pj} \cdot \lambda}}\end{aligned}\quad (2.39)$$

Selain mempergunakan persamaan (2.39) besarnya X juga bisa dihitung berdasarkan gambar 2.14. dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}z/l &= \frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)/2}{X} \\ X \cdot z/l &= \frac{\Delta f_{ps}(\emptyset)}{2}\end{aligned}\quad (2.40)$$

Jika persamaan (2.38) dimasukkan ke dalam persamaan (2.40) akan didapatkan persamaan sebagai berikut:



$$X \frac{z}{l} = E_{ps} \cdot \delta / X$$

$$X^2 = \frac{E_{ps} \cdot \delta}{(z/l)}$$

$$X = \sqrt{\frac{E_{ps} \cdot \delta}{(z/l)}} \quad (2.41)$$

dimana $z = f_{pj} - f_{ps}(l)$ dan $f_{ps}(l) = f_{pj} \cdot e^{-\lambda l}$

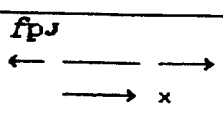



$$\begin{aligned} z &= f_{pj} - f_{pj} \cdot e^{-\lambda l} \\ &= f_{pj}(1 - e^{-\lambda l}) \end{aligned} \quad (2.42)$$

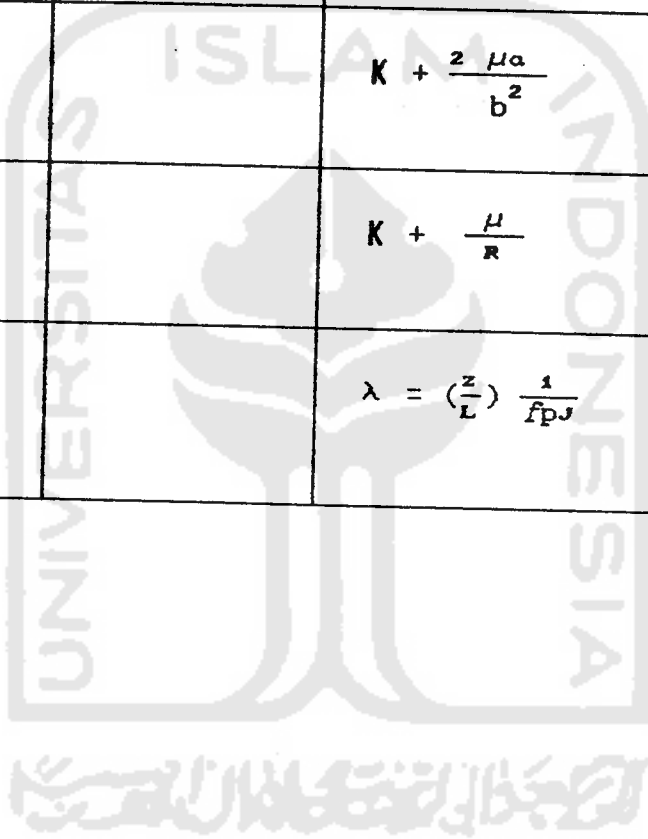
dengan mempergunakan ekspansi taylor maka didapatkan:

$$\begin{aligned} z &= f_{pj}[1 - (1 - \lambda l)] \\ &= f_{pj} \cdot \lambda \cdot l \end{aligned} \quad (2.43)$$

dimana λ diperlihatkan pada tabel 2.7.

Tabel 2.7. Pengaruh bentuk tendon terhadap besarnya λ

Bentuk Tendon	Gambar	$\lambda = \frac{KL + \lambda\mu}{x}$	X
Lurus		K	$X = \sqrt{\frac{E_s \delta}{K f_{pJ}}}$
Parabola		$K + \frac{2 \mu \alpha}{b^2}$	$X = \sqrt{\frac{E_s \delta}{(K + \frac{2 \mu \alpha}{b^2}) f_{pJ}}}$
Lingkaran		$K + \frac{\mu}{R}$	$X = \sqrt{\frac{E_s \delta}{(K + \frac{\mu}{R}) f_{pJ}}}$
Lurus miring		$\lambda = \left(\frac{z}{L}\right) \frac{1}{f_{pJ}}$	$X = \sqrt{\frac{E_s \delta}{(z/z+1)}}$



2.2.4. Susut pada beton

Susut adalah peristiwa perubahan bentuk pada beton yang disebabkan oleh penguapan air dari pori-pori selama proses pengeringan yang besarnya tergantung pada waktu. Susut pada beton dipengaruhi oleh besarnya kadar air dalam campuran, kelembaban udara, tipe dan kualitas agregat serta cara perawatan^{[1][2][3][8]}.

Akibat terjadinya susut (perpendekan) pada beton, maka akan terjadi pengurangan terhadap panjang beton yang akan menyebabkan terjadinya pengurangan terhadap panjang tendon, sehingga besarnya gaya pratekan akan berkurang.

Besarnya regangan akibat susut sampai pada waktu tertentu t , beton dapat dihitung dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut^[9]:

$$\epsilon_s(t) = g(t) \cdot \epsilon_{su} \cdot K_{SH} \cdot K_{SS} \quad (2.44)$$

dimana $g(t)$ adalah fungsi waktu, t adalah waktu dalam hari setelah akhir dari perawatan, ϵ_{su} adalah regangan ultimit akibat susut, K_{SH} adalah koefisien yang tergantung dari besarnya kelembaban rata-rata lingkungan dimana beton dibuat, K_{SS} adalah koefisien yang tergantung dari bentuk dan ukuran beton.

Tabel 2.8. Koefisien akibat bentuk dan ukuran balok

perbandingan volume dengan luas permukaan		ukuran dan bentuk	
in	cm	rangkak	susut
1	2.54	1.05	
2	5.1	0.96	0.96
3	7.6	0.87	0.86
4	10.2	0.77	0.77
5	12.7	0.68	0.69
6	15.2	0.68	0.60

Besarnya K_{sh} diperlihatkan pada tabel 2.9. dan K_{ss} diperlihatkan pada tabel 2.8. sedangkan besarnya ϵ_{su} bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut⁽⁹⁾:

$$\epsilon_{su} = [2 + \frac{11}{230}(\omega - 220)]10^{-4} \quad (2.45)$$

dimana ω adalah kadar air dalam pound per detik yard, dan

$$\epsilon_{su} = [2 + \frac{11}{1337}(\omega - 1279)]10^{-4} \quad (2.46)$$

dimana ω adalah kadar air dalam Newton per m^3 . Untuk fungsi waktu $g(t)$ besarnya diperlihatkan pada tabel 2.9., akan tetapi apabila kondisi lingkungan konstan fungsi waktu bisa dihitung dari persamaan di bawah⁽⁹⁾:

$$g(t) = \frac{t}{b + t} \quad (2.47)$$

dimana t dalah waktu dalam hari, b sama dengan 35 untuk



perawatan basah dan sama dengan 55 untuk perawatan dengan mempergunakan uap. Persamaan lain yang bisa dipergunakan untuk menghitung $g(t)$ adalah^[9]:

$$g(t) = 0,157 \ln(t) - 0,115 \quad (2.48)$$

dimana t adalah waktu dalam hari setelah perawatan. Oleh karena terjadi perpendekan akibat susut pada beton sebesar $\epsilon_s(t)$, maka pada baja akan mengalami pengurangan tegangan sebesar^{[1][7][9][10]}:

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps} &= E_{ps} \cdot \epsilon_s(t) \\ &= E_{ps} \cdot g(t) \cdot \epsilon_{su} \cdot K_{SH} \cdot K_{SS} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Dimana E_{ps} adalah modulus elastisitas baja dan besarnya $\epsilon_s(t)$ bisa di dapat dari persamaan (2.44). Guna memperhitungkan besarnya kehilangan tegangan dari waktu t_i hingga t_j bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan berikut^[9]:

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps}(t_i, t_j) &= [\Delta f_{ps}(t_i) - \Delta f_{ps}(t_j)] \\ &= E_{ps} \cdot \epsilon_{su} \cdot K_{SH} \cdot K_{SS} \cdot [g(t_i) - g(t_j)] \end{aligned} \quad (2.50)$$

dimana $\Delta f_{ps}(t_i)$ adalah kehilangan tegangan pada waktu t_i dan $\Delta f_{ps}(t_j)$ adalah kehilangan tegangan pada waktu t_j . Pada jangka waktu antara t_i dan t_j , waktu permulaan pada jangka waktu tersebut (t_i) menggambarkan waktu akhir dari perawatan beton.



Tabel 2.9. Faktor Koefisien rongkok dan susut

		Nilai konstanta	
		Perawatan basah	Perawatan kering
Tegangan desak	Untuk, $t \geq 1$ hari $f_c'(t) = \frac{t}{b+ct} f_c'(28)$	Semen type I $b = 4$ $c = 0.85$	Semen type I $b = 1$ $c = 0.95$
		Semen Type III $b = 2.30$ $c = 0.92$	Semen type III $b = 0.70$ $c = 0.98$
Tegangan susut	$\epsilon_s(t) = \frac{t}{b+ct} \cdot \epsilon_s + KSH \cdot KSS$ KSH = faktor koreksi kelembaban KSS = faktor ukuran dan bentuk	40% $\leq H \leq 80\%$ $b = 35$ $t \geq 7$ hari	40% $\leq H \leq 80\%$ $b = 55$ $t \geq 1-3$ hari
		80% $\leq H \leq 100\%$ $b = 35$ $t \geq 7$ hari KSH = $3 - 0.03 \cdot H$ KSS = lihat tabel 2.8	80% $\leq H \leq 100\%$ $b = 55$ $t \geq 1-3$ hari KSH = $3 - 0.03 \cdot H$ KSS = lihat tabel 2.8
Koefisien rangkak	$C_c(t) = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} C_{cu}$ KCH, KCA, KCS KCH = Faktor Koreksi Kelembaban KCA = Faktor Umur Pembebanan KCS = Faktor Umur Dan Bentuk t_A = Umur Pembebanan	$t, t_A \geq 7$ hari $H \geq 40\%$ $KCA = 1.25 t_A^{0.118}$ $KCH = 1.27 - 0.0067H$ KCS lihat tabel 2.8	$t, t_A \geq 1 - 3$ hari $H \geq 40\%$ $KCA = 1.13 t_A$ $KCH = 1.27 - 0.0067 \cdot H$ KCS lihat tabel 2.8



Jika persamaan (2.47) dimasukkan ke dalam persamaan (2.50) maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$\Delta f_{ps}(t_i, t_j) = E_{ps} \cdot \epsilon_{su} \cdot K_{SH} \cdot K_{SS} \cdot \frac{b(t_j - t_i)}{(b + t_i)(b + t_j)} \quad (2.51)$$

Jika dipergunakan persamaan (2.48) dan persamaan (2.50) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta f_{ps} = 0,157 \cdot E_{ps} \cdot \epsilon_{su} \cdot K_{SS} \cdot K_{SH} \cdot \ln(t_j/t_i) \quad (2.52)$$

Dimana waktu t dinyatakan dalam hari, yang tidak boleh lebih besar dari pada 1214 hari dan waktu awalnya sama dengan 2,08 hari. Kehilangan tegangan pada 1214 hari atau lebih dianggap sama dengan kehilangan tegangan hingga akhir umur dari pada beton.

2.2.5. Rangkak pada beton

Selain terjadi perpendekan elastis, maka pada beton pratekan akan terjadi perpendekan elastis atau disebut juga dengan rangkak, sebagai akibat adanya tekanan yang terus menerus. Perpendekan elastis ini ditandai dengan tidak kembalinya kepada bentuk semula apabila tekanan dihilangkan.

Besarnya regangan akibat rangkak pada suatu waktu t bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon_c(t) = C_c(t) \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.53)$$

dimana ϵ_{cu} adalah regangan elastis beton dan $C_c(t)$ adalah koefisien rangkai hingga waktu t .

Apabila tekanan hingga akhir pelayanan beton dianggap sama, maka besarnya regangan ultimit akibat rangkai pada beton bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan berikut^{[7][9]}:

$$\epsilon_{cu} = C_{cu} \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.54)$$

dimana ϵ_{cu} adalah regangan ultimit beton akibat rangkai dan C_{cu} = koefisien ultimit rangkai.

Tabel 2.10. Koefisien ultimit rangkai beton

tegangan desak		bisa digunakan dengan
psi	Mpa	
3000	20.7	3.1
4000	27.6	2.9
5000	34.5	2.65
6000	41.4	2.4
7000	48.3	2.2
8000	55.2	2.0

Besarnya koefisien ultimit rangkai diperlihatkan pada tabel 2.10.

Besarnya regangan hingga jangka waktu tertentu dipengaruhi oleh fungsi waktu, koefisien akibat bentuk dan ukuran batang, lamanya pembebanan serta faktor koreksi yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif rata-rata lingkungan, dimana beton pratekan dibuat.



Akibat adanya beberapa faktor yang berpengaruh tersebut maka besarnya regangan akibat rangkaiak hingga waktu t bisa dihitung dengan mempergunakan persamaan berikut⁽⁹⁾:

$$E_c(t) = g(t) \cdot C_{cu} \cdot K_{CA} \cdot K_{CH} \cdot K_{CS} \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.55)$$

dimana $g(t)$ adalah fungsi waktu dalam hari, K_{CA} adalah faktor koreksi akibat lamanya pembebanan, K_{CH} adalah faktor koreksi yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif rata-rata dimana beton dibuat dan K_{CS} adalah faktor koreksi akibat bentuk dan ukuran batang.

Besarnya K_{CA} , K_{CH} dan $g(t)$ diperlihatkan pada tabel 2.9. sedangkan besarnya K_{CS} diperlihatkan pada tabel 2.8.

Guna memperhitungkan besarnya regangan akibat rangkaiak pada jangka waktu t_i sampai t_j , dengan menganggap tegangan serta regangan elastis konstan, diperoleh dengan mempergunakan persamaan sebagai berikut⁽⁹⁾:

$$\Delta \epsilon_c(t_i, t_j) = [g(t_j) - g(t_i)] \cdot C_{cu} \cdot K_{CA} \cdot K_{CH} \cdot K_{CS} \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.56)$$

Akibat rangkaiak yang terjadi, maka akan menyebabkan terjadinya perpendekan pada beton yang akan mengakibatkan baja juga memendek dan besarnya sama dengan besarnya perpendekan beton. Oleh karena itu pengurangan tegangan pada baja dalam jangka waktu t dapat dihitung, yaitu:

$$\Delta f_{ps}(t) = E_s \cdot \epsilon_c(t)$$

$$= E_s \cdot g(t) \cdot C_{cu} \cdot K_{CA} \cdot K_{CS} \cdot K_{CH} \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.57)$$

Sedangkan guna memperhitungkan besarnya kehilangan tegangan diantara jangka waktu t_i hingga t_j diperoleh dengan mempergunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \Delta f_{ps}(t_i, t_j) &= E_s \cdot \Delta \epsilon_{ci}(t_i, t_j) \\ &= E_s [g(t_j) - g(t_i)] \cdot C_{cu} \cdot K_{CA} \cdot K_{CS} \cdot K_{CH} \cdot \epsilon_{ci} \quad (2.58) \end{aligned}$$

Besarnya regangan elastis beton ϵ_{ci} dipengaruhi oleh besarnya tegangan pada beton akibat gaya pratekan dan beban luar $f_c(t_i)$,

$$\epsilon_{ci} = \frac{f_c(t_i)}{E_c} \quad (2.59)$$

dimana $f_c(t_i)$ adalah tegangan pada beton pada waktu t_i yang disebabkan oleh gaya pratekan dan beban luar dan E_c adalah modulus elastis beton.

Dengan memasukkan persamaan (2.59) ke dalam persamaan (2.58), maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta f_{ps}(t_i, t_j) = n_p \cdot C_{cu} \cdot K_{CH} \cdot K_{CS} \cdot K_{CA} \cdot f_c(t_i) [g(t_i) - g(t_j)] \quad (2.60)$$

dimana $n_p = E_s/E_c$, sedangkan $f_c(t_i)$ bisa diperoleh dari persamaan berikut:

$$f_c(t_i) = P_e(t_i) \left(\frac{1}{A_c} + \frac{e \cdot y}{I} \right) - \frac{M \cdot y}{I}$$

Dari persamaan (2.61), $P_e(t_i)$ adalah gaya pratekan efektif pada waktu t_i yang besarnya didapat dengan mengurangi gaya pratekan efektif awal, dengan kehilangan gaya pratekan hingga waktu t_i . Hal ini diperlihatkan dari persamaan berikut^[9]:

$$P_e(t_i) = P_e - \Sigma \Delta P_e(t_i) \quad (2.62)$$

dimana P_e adalah gaya pratekan efektif awal dan $\Sigma \Delta P_e(t_i)$ adalah kehilangan gaya pratekan hingga waktu t_i .

2.2.5. Relaksasi pada baja

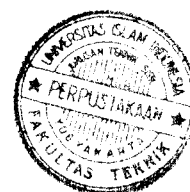
Apabila suatu kawat baja mutu tinggi ditegangkan dan tetap dipertahankan pada suatu regangan yang konstan, maka gaya awal dalam kawat tidak akan tetap konstan, tetapi berkurang dengan waktu^{[2][7][9]}. Pengurangan tegangan dalam baja dalam regangan konstan seperti tersebut di atas disebut dengan relaksasi ("relaxation").

Besarnya pengurangan tergantung pada lamanya waktu dan perbandingan f_{pi}/f_{py} , seperti terlihat pada gambar 2.15.

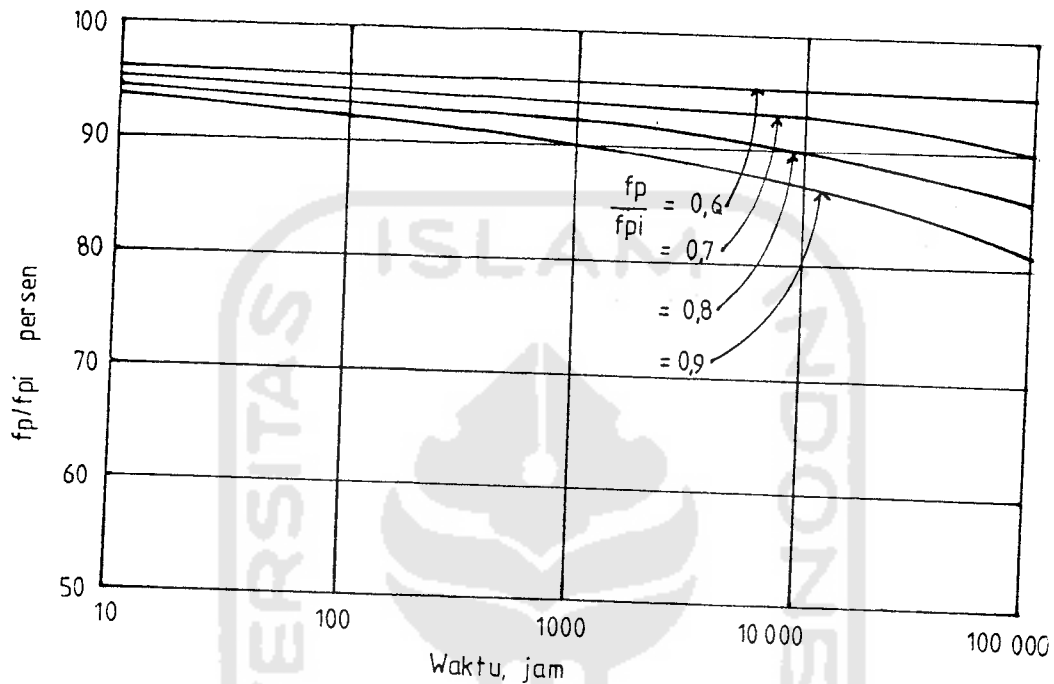
Besarnya tegangan pada baja pada waktu t dihitung dengan mempergunakan persamaan berikut^{[2][7][9]}:

$$f_{ps}(t) = f_{pi} \left[1 - \frac{\log t}{10} \left(\frac{f_p}{f_{py}} - 0,55 \right) \right] \quad (2.63)$$

dimana t adalah waktu dalam jam setelah penegangan dan perbandingan f_{pi}/f_{py} tidak boleh lebih kecil dari 0,55.



f_{ey} adalah tegangan leleh baja yang diperlihatkan pada tabel 2.5. dan f_{pi} adalah tegangan awal pada baja.



Gambar 2.15. Kurva relaksasi baja

Besarnya kehilangan tegangan pada baja setelah t jam dari saat penegangan, sama dengan tegangan awal baja f_{pi} dikurangi dengan tegangan pada baja setelah t jam $f_{ps}(t)$, seperti diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$\Delta f_p = f_{pi} - f_{ps}(t)$$

$$= f_{pi} - f_{pi} \left[1 - \frac{\log t}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \right]$$

$$= f_{pi} \frac{\log t}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (2.64)$$

Untuk mengetahui besarnya kehilangan tegangan pada jangka waktu antara t_i dan t_j , bisa dipergunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 \Delta f(t_i, t_j) &= f_{ps}(t_i) - f_{ps}(t_j) \\
 &= f_{pi} \left[1 - \frac{\log(t_i)}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \right] \\
 &\quad - f_{pi} \left[1 - \frac{\log(t_j)}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \right] \\
 &= f_{pi} \frac{\log(t_j)}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \\
 &\quad - f_{pi} \frac{\log(t_i)}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \\
 &= f_{pi} \left(\frac{\log(t_j) - \log(t_i)}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \\
 &= \frac{f_{pi}}{10} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \log \left(\frac{t_j}{t_i} \right) \quad (2.65)
 \end{aligned}$$

Terdapat batasan terhadap f_{pi} yaitu sebesar 0,7 $f_{pu}^{[2]}$. Jika dipergunakan baja dengan mutu relaksasi yang rendah, maka angka koefisien 10 diganti dengan 45^{[7][9]}. Sehingga persamaan (2.64) dan (2.65) berubah menjadi:

$$\begin{aligned}
 \Delta f &= f_{pi} \frac{\log t}{45} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \\
 \Delta f(t_i, t_j) &= \frac{f_{pi}}{45} \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \log \left(\frac{t_j}{t_i} \right) \quad (2.66)
 \end{aligned}$$



2.2.7. Jumlah kehilangan gaya pratekan total

Kehilangan gaya pratekan total biasanya dipergunakan dalam mendisain batang-batang pratekan. Besarnya dinyatakan dalam prosentase dari tegangan awal. Di bawah ini diberikan besarnya kehilangan tegangan total yang dianjurkan^[2].

Tabel 2.11. Jumlah kehilangan gaya pratekan

	Pratarik, %	Pascatarik, %
Perpendekan elastis beton	4	1
Rangkak beton	6	5
Susut beton	7	6
Relaksasi baja	8	8
Kehilangan total	25	20

Peristiwa kehilangan tegangan yang terjadi pada batang pretension adalah:

- deformasi elastis beton,
- relaksasi tegangan pada baja,
- susut pada beton,
- rangkak pada beton.

Sedangkan peristiwa kehilangan tegangan yang terjadi pada batang postension adalah:

- relaksasi tegangan pada baja,
- susut pada beton,
- rangkak pada beton,
- gesekan,
- penggelinciran pada angker.