

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Istimawan (1994) mendefinisikan struktur beton prategang sebagai suatu sistem struktur beton khusus dengan cara memberikan tegangan awal tertentu pada komponen sebelum digunakan untuk mendukung beban luar sesuai dengan yang diinginkan. Tujuan memberikan tegangan awal tekan beton pada lokasi dimana nantinya akan timbul tegangan tarik pada waktu komponen mendukung beban sedemikian rupa sehingga diharapkan sewaktu beban seluruhnya bekerja tegangan tarik total berkurang atau lenyap sama sekali.

Menurut Lin & Burns (1993) bahwa apa yang disebut sistem beton prategang sesungguhnya adalah cara menegangkan atau menarik baja yang dikombinasikan dengan cara mengangkurnya ke beton, termasuk barangkali beberapa rincian lain mengenai operasi/cara kerjanya.

Lin & Burns (1993) juga menyatakan bahwa salah satu pertimbangan istimewa pada beton prategang adalah banyaknya tahapan pembebanan dimana sebuah komponen struktur dibebani. Beberapa dari tahapan pembebanan ini terjadi juga pada struktur yang bukan prategang, tetapi yang lainnya terjadi hanya akibat prategang. Untuk struktur yang dicor setempat, beton prategang harus

didesain paling sedikit dua tahap, tahap awal pada saat pemberian gaya prategang dan tahap akhir pada saat dibebani beban eksternal. Untuk beton pracetak, tahap ketiga yaitu pengangkatan dan pengangkutan harus diteliti.

Naaman (1982) memberikan definisi lendutan sebagai perubahan posisi suatu titik dari batang sebelum bekerjanya beban sampai beban itu bekerja. Pada beton bertulang, lendutan diakibatkan oleh beban dan merupakan lendutan ke bawah sedangkan pada beton prategang, lendutan tergantung pada kombinasi pengaruh dari gaya prategang dan beban luar. Hal yang demikian ini akan lebih mudah dikontrol dengan merubah tampang dan besarnya gaya prategang. Pada balok bertulang dan beton prategang, lendutan di bawah pembebanan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu terutama pengaruh rangkak dan susut pada beton dan relaksasi dari baja prategang. Lendutan yang berlebihan terutama yang bertambah dengan waktu secara bersamaan, menyebabkan kesulitan dan harus dibatasi.

Menurut Lin dan Burns (1993) bahwa seperti biasa pada tiap komponen beton, dua kesulitan yang masih ditemukan jika kita ingin mendapatkan ramalan lendutan yang lebih teliti. Pertama, sulit menentukan nilai E_c dengan ketelitian 10% atau malahan dengan 20%. Percobaan-percobaan mengenai beton silinder contoh mungkin tidak memberikan nilai E_c yang tepat. Karena nilai E_c untuk balok dapat berbeda dari yang untuk silinder. Disamping itu, nilai E_c yang berubah-ubah untuk tegangan yang berbeda dan berubah menurut usia beton. Kesukaran yang kedua terletak dalam memperkirakan akibat rangkak pada

lendutan. Nilai dari koefisien rangkai, seperti besar dan lamanya beban yang berkerja, tidak dapat diperkirakan terlebih dahulu.

Menurut Wang & Salmon (1986) bahwa rangkai dan susut adalah deformasi tergantung dari waktu, yang retak menimbulkan kerisauan yang terbesar bagi perencana disebabkan kurang tepatan dan kurangnya pengetahuan tentang rangkai dan susut. Beton bersifat elastis hanya di bawah pembebanan yang singkat, dan karena penambahan deformasi sesuai dengan waktu maka sifat dari beton adalah sama dengan sifat bahan yang tidak elastis. Oleh karenanya lendutan setelah jangka panjang yang lama menjadi sangat sulit diperkirakan, sekalipun pengendaliannya adalah diperlukan untuk menjamin kelayakan dari struktur selama umur layanannya.

Wang & Salmon (1986) juga menyatakan bahwa rangkai adalah satu sifat dari beton dimana beton mengalami deformasi yang terus menerus menurut waktu di bawah beban yang dipikul pada suatu satuan tegangan dalam batas elastis yang diperbolehkan. Deformasi yang tidak elastis ini bertambah dengan tingkat perubahan yang berkurang selama pembebanan, dan jumlah totalnya dapat mencapai besar berapa kali dari deformasi elastis dalam jangka waktu pendek. Seringkali rangkai ini dihubungkan dengan susut, karena keduanya terjadi bersamaan dan kerap kali memberikan pengaruh yang sama yaitu deformasi yang bertambah sesuai dengan waktu.

Libby (1987) memberikan definisi relaksasi sebagai kehilangan tegangan suatu material yang dikenai tegangan konstan. Walaupun tidak mengalami

regangan konstan, hal ini umumnya disesuaikan pada kondisi yang lebih mendekati regangan yang konstan.

2.2 Konsep Dasar Beton Prategang

Lin dan Burns (1993) mengemukakan, ada tiga konsep yang berbeda-beda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Hal ini penting bagi seorang perancang untuk mengerti ketiga konsep tersebut supaya dapat mendesain beton prategang seefisien mungkin. Ketiga konsep tersebut dapat diuraikan sebagai berikut ini.

1. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis

Konsep ini dikemukakan oleh Eugene Freyssinet dalam Lin dan Burns (1993), bahwa beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis. Hal ini dikarenakan beton tidak mengalami retak di bagian tarik balok walaupun terjadi tarikan. Atas dasar pandangan ini, beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan, yaitu : gaya internal prategang dan beban eksternal, dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya prategang (tendon).

2. Sistem Prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton.

Seperti halnya pada beton bertulang, konsep ini mempertimbangkan juga kombinasi dari baja dan beton, yaitu baja menahan tarik dan beton menahan gaya desak, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel gaya untuk melawan momen eksternal. Kelebihan beton prategang merupakan modifikasi pemakaian beton bertulang dengan memakai baja berkekuatan tinggi.

3. Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban.

Konsep ini menganggap beton sebagai benda bebas (*freebody*) dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya yang bekerja merata pada beton sepanjang bentangan, sehingga diperoleh gaya-gaya yang bekerja menjadi seimbang.

2.3 Sistem Prategang

Metode pelaksanaan prategang pada tendon menurut Winarni (1987), dilakukan dua cara yang sering digunakan, yaitu pratarik (*pretensioned*) yang dimaksudkan untuk menggambarkan metode sistem prategang karena tendon-tendon ditarik sebelum beton dicor. Alternatif dari sistem pratarik adalah pasca tarik (*posttensioned*), dalam metode ini tendon ditarik setelah beton mengeras.

2.4 Bahan-bahan Beton Prategang

2.4.1 Beton

Menurut Lin dan Burns (1993), beton yang digunakan untuk metode prategang harus memenuhi kriteria sebagai berikut ini.

1. Persyaratan Kekuatan Beton

Dalam perencanaan di lapangan, beton yang lebih kuat biasanya dibutuhkan untuk pekerjaan beton prategang daripada untuk beton konvensional. Beton untuk prategang umumnya digunakan yang mempunyai kekuatan tekan berkisar antara 24 hingga 55 Mpa untuk sampel beton silinder yang berumur 28 hari. Sedangkan untuk sampel beton kubus diambil 1.25 kali kekuatan sampel beton silinder.

2. Karakteristik Regangan Beton

Pada beton prategang, regangan-regangan beton sangat penting untuk diketahui. Karena hal ini untuk memperkirakan kehilangan gaya prategang pada baja dan untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh lain dari pemendekan pada beton, seperti : regangan elastis, rangkai, dan susut.

2.4.2 Baja untuk Tendon

Baja mutu tinggi adalah bahan yang harus dipakai agar menghasilkan gaya prategang dan mensuplai gaya tarik pada beton. Cara pembuatan baja mutu tinggi dapat dikerjakan dengan pencampuran (*alloying*) baja dengan karbon. Semakin tinggi kadar karbon semakin kuat dan keras baja yang dihasilkan tetapi semakin kurang liat. Cara lain untuk memperbaiki sifat baja tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain : pengerjaan panas (*flame hardening*) dan pengerjaan dingin (*cold work*). Pengerjaan panas dilakukan dengan cara memanasi permukaan baja sampai di atas suhu rekristalisasi kemudian didinginkan secara mendadak dengan cara dicelupkan ke dalam air atau minyak. Pengerjaan dingin dikerjakan dengan cara penggilasan permukaan baja oleh roda baja yang keras.

Pemakaian baja mutu tinggi untuk tendon dipilih di antara tiga jenis, yaitu kawat (*wire*), untaian kawat (*strand*), dan batang (*bar*). Tendon jenis kawat di lapangan terdapat dua bentuk, yaitu : bentuk polos dan berulir yang disuplai dalam bentuk gulungan panjang. Karena itu tendon kawat cocok digunakan untuk beton pratarik yang memerlukan rekatan langsung dengan beton. Keuntungan lainnya, karena kawat tendon sangat panjang sehingga dapat digunakan untuk membuat

beberapa balok beton prategang dalam satu kali tarikan. Meskipun demikian tendon kawat dapat pula digunakan untuk beton pascatarik tetapi dirasakan tidak efektif dibandingkan dengan tendon jenis untaian kawat (*strand*).

Strand dibuat di pabrik dengan memintir beberapa kawat bersama-sama sehingga dapat mengurangi jumlah satuan yang harus dikerjakan pada saat operasi penarikan tendon. Tendon jenis ini mempunyai kuat batas yang tinggi di atas 1700 MPa tergantung jumlah kawatnya. *Strand* dengan tujuh kawat sering digunakan dalam beton prategang baik untuk *pretensioned* maupun *post tensioned*, meskipun harganya lebih mahal dari pada kumpulan kawat dengan kekuatan tarik yang sama. Tendon tujuh kawat mempunyai karakteristik rekatan dengan tendon yang lebih baik dan hemat dalam penarikannya.

Pemakaian tendon batang di lapangan terdapat dalam bentuk polos dan ulir. Pemakaian dalam beton prategang terbatas pada balok yang bentangnya pendek. Diameter tendon batang dimulai 25.4 mm sampai 34.9 mm dengan kekuatan tegangan tarik berkisar 1000 MPa sampai 1600 MPa.

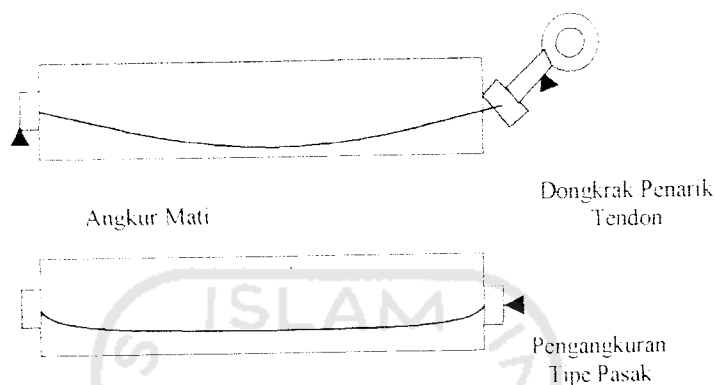
2.4.3 Pengangkuran Ujung

Prinsip pengangkuran ujung tendon balok beton dengan sistem *post tensioned* ada dua metode, yaitu :

1. dengan prinsip kerja pasak yang menghasilkan penjepit geser pada kabel,
2. dengan perletakan langsung dari paku keling atau baut yang dipasang pada ujung kabel.

Kedua metode ini dibuat secara sistematis. Setelah beton mengeras, mula-mula tendon-tendon diselipkan melalui selubung kemudian di salah satu ujung tendon dibuat pengangkuran perletakan langsung dari kepala paku keling atau

baut. Setelah ankur dibuat, lalu dioperasikan penarikan kemudian gaya prategang ditambahkan pada ankur jenis pengangkuran pasak yang menahan gesekan tendon. Gambar 2.1 berikut ini menggambarkan metode pengangkuran tendon.



Gambar 2.1. Prinsip pengangkuran pada sistem *post tensioned*

2.4.4 Bahan Pelengkap

Di antara bahan pelengkap yang dibutuhkan untuk beton prategang antara lain adalah bahan pengisi (*grouting*) untuk selubung tendon (*sheath*). Untuk sistem pratarik tidak ada selubung yang diperlukan. Untuk sistem pasca tarik, ada dua macam selubung (*sheath*), yaitu untuk sistem prategang dengan rekatan (*bonded*), dan yang untuk tanpa rekatan (*unbonded*).

Jika tendon diberi rekatan, umumnya dengan *grouting* melalui selubungnya, biasanya dipakai semen biasa atau semen yang mempunyai kemampuan tinggi dicampur dengan air. Sedangkan untuk tendon tanpa rekatan, biasanya dipakai plastik atau kertas tebal sebagai pembungkus dan tendon diberi minyak (*grease*) untuk mempermudah penarikan dan untuk mencegah karat.

2.5 Perencanaan Bentuk Penampang

2.5.1 Tinjauan Umum

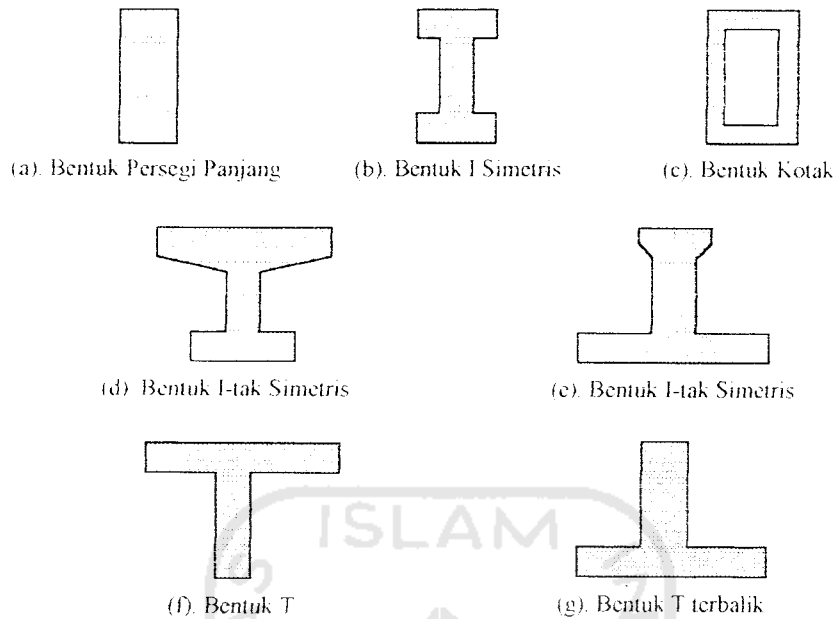
Proses perhitungan perencanaan balok beton prategang terdiri dari beberapa langkah. Pertama kali dilakukan pemilihan bentuk dan ukuran penampang, kemudian peninjauan besar gaya prategang dan eksentrisitas tendon untuk penampang dengan beban atau momen yang terjadi dan berikutnya penentuan tata letak (*lay-out*) tendon sepanjang balok. Kemudian berdasarkan pada hasil penetapan tersebut dilakukan pemeriksaan, terutama terhadap tegangan yang terjadi.

2.5.2 Bentuk dan Ukuran Penampang

Bentuk-bentuk penampang yang seringkali digunakan untuk beton prategang, antara lain sebagai berikut ini.

1. Penampang I simetris
2. Penampang I tak simetris
3. Penampang T
4. Penampang T terbalik
5. Penampang kotak (*box*)
6. Penampang persegi panjang.

Bentuk-bentuk penampang dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini



Gambar 2.2. Bentuk-bentuk penampang

Dalam praktek, tinggi penampang h biasanya sudah ditentukan, diketahui, atau diasumsikan. Suatu aturan aproksimasi adalah menggunakan 70 % penampang balok beton bertulang konvensional. Cara empiris lainnya juga ada. Umpamanya, tebal pelat beton prategang bervariasi antara $L/35$ untuk beban berat dan $L/55$ untuk beban ringan, dalam Lin dan Burns (1993). Winarni (1987) memberikan persamaan untuk pendekatan besarnya tinggi balok, sebagai berikut :

$$h = k \cdot \sqrt{M} \quad (2.1)$$

dengan M : momen maksimum yang terjadi dalam t.m

$$k : 10 - 15$$

Nilai-nilai modulus tampang dengan memperhitungkan kehilangan tegangan, digunakan untuk memilih dan menentukan penampang yang memenuhi syarat-syarat modulus tampang yang diperlukan baik terhadap sisi atas dan bawah adalah sebagai berikut ini.

$$S' \geq \frac{(1 - R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{R \cdot f_n - f_{cs}} \quad (2.2.a)$$

dan

$$S_b \geq \frac{(1 - R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{f_n - R \cdot f_{cs}} \quad (2.2.b)$$

dengan

R : rasio kehilangan gaya prategang

M_D : momen yang terjadi akibat berat sendiri balok dalam kN.m

M_{SD} : momen yang terjadi akibat beban mati dalam kN

M_L : momen yang terjadi akibat beban hidup dalam kN

S_b : modulus tampang terhadap sisi bawah dalam m

S' : modulus tampang terhadap sisi atas dalam m

2.5.3 Tinjauan Tegangan terhadap Gaya Prategang

Dalam bentuk yang paling sederhana, diambil bentuk penampang persegi panjang yang diberi gaya prategang oleh sebuah tendon melalui titik berat dan dibebani oleh gaya eksternal. Gaya tarik prategang pada tendon menghasilkan gaya tekan P yang sama pada beton yang bekerja pada titik berat tendon. Pada keadaan ini gaya berada pada titik berat penampang beton. Akibat gaya prategang P , tegangan tekan merata sebesar :

$$f = - \frac{P}{A_c} \quad (2.3)$$

akan timbul pada penampang seluas A_c . Jika M adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, maka tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah :

$$f^t = -\frac{P}{A_c} - \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.4.a)$$

dan

$$f_b = -\frac{P}{A_c} + \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.4.b)$$

dengan

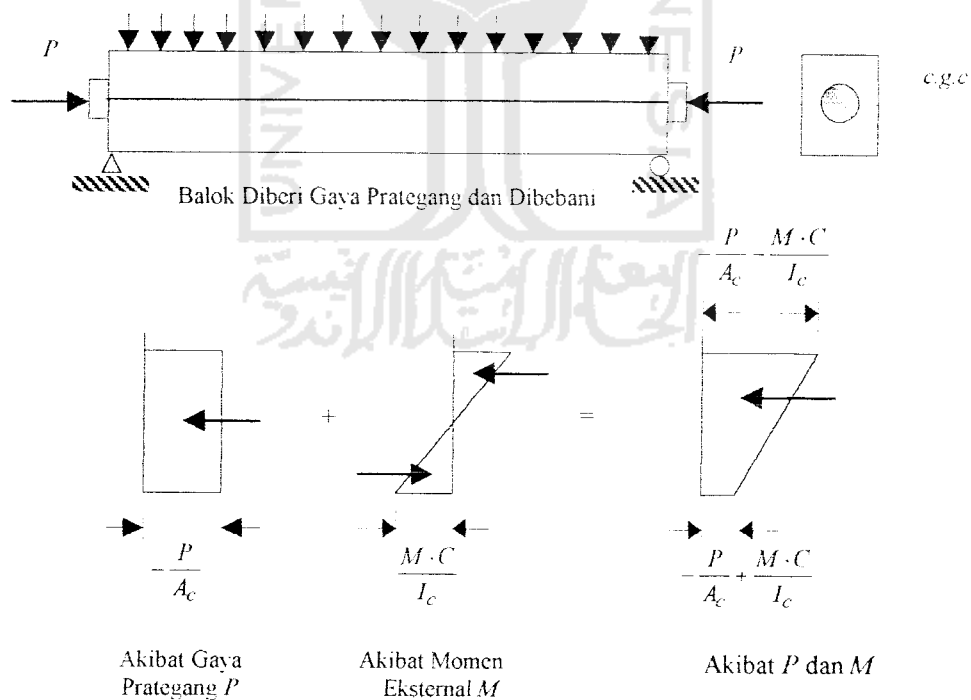
f^t : tegangan pada serat atas dalam kN

f_b : tegangan pada serat bawah dalam kN

M : momen eksternal dalam kN.m

C : jarak dari sumbu yang melalui titik berat tendon dalam m

I_c : momen inersia bruto penampang dalam m^4



Gambar 2.3. Distribusi tegangan sepanjang penampang balok beton prategang sentris

Apabila tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton, resultan gaya tekan P pada beton bekerja pada titik berat tendon yang

berjarak e dari *c.g.c.* Akibat gaya prategang yang eksentrisitas, beton dibebani oleh momen dan beban langsung. Jika momen yang dihasilkan oleh sistem prategang adalah $P \cdot e$ dan tegangan-tegangan akibat momen ini adalah :

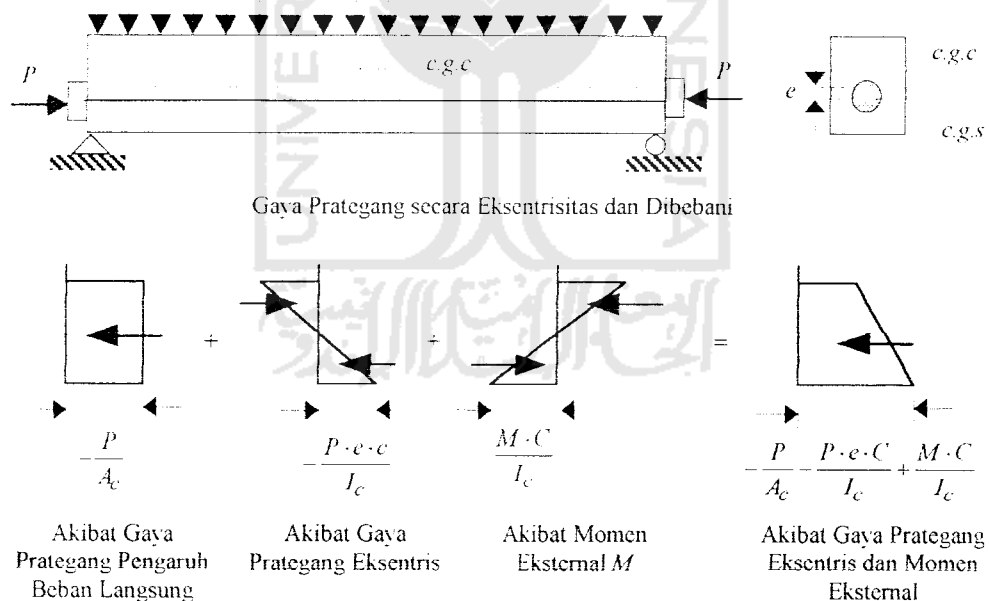
$$f = \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} \quad (2.5)$$

Maka, distribusi tegangan yang dihasilkan adalah :

$$f' = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} - \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.6.a)$$

dan

$$f_b = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} + \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.6.b)$$

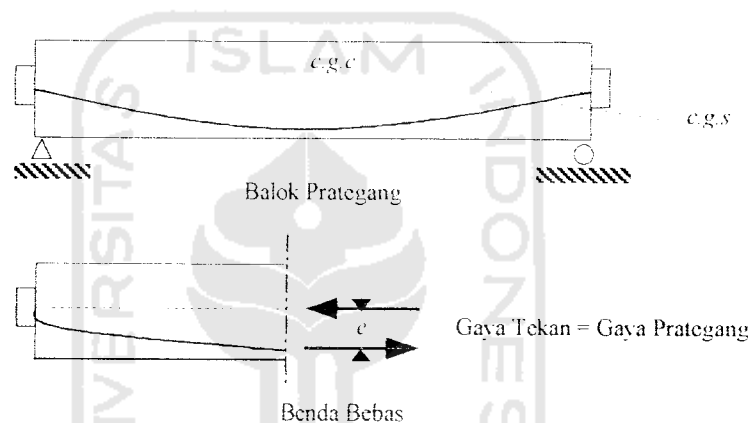


Gambar 2.4. Distribusi tegangan sepanjang penampang beton prategang eksentris

Bila tendon dilengkungkan, seringkali lebih disukai untuk mengambil bagian kiri atau kanan dari batang sebagai benda bebas untuk memulai besarnya pengaruh gaya prategang P . Resultan tekanan pada beton akibat gaya prategang

saja akan sama besarnya dengan gaya kabel P yang bekerja dengan eksentrisitas sebesar e . Jadi pada Gambar 2.5, keseimbangan gaya-gaya horisontal menunjukkan bahwa tekanan pada beton menyamai besarnya gaya prategang P pada baja, dan tegangan pada beton akibat gaya eksentrisitas P dinyatakan dengan,

$$f = -\frac{P}{A_c} \pm \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} \quad (2.7)$$



Gambar 2.5. Pengaruh gaya prategang

Jadi, tegangan beton P pada penampang akibat gaya prategang hanya tergantung pada besar dan letak gaya P pada penampang tanpa memperhatikan perubahan profil tendon di tempat lain sepanjang balok.

Dari Persamaan (2.5.a) dan (2.5.b) dapat dimodifikasi dan disederhanakan untuk digunakan dalam menghitung tegangan-tegangan pada tahap pelimpahan gaya prategang (transfer) dan pada tahap beban kerja (layan). Jika P_i adalah gaya prategang awal sebelum kehilangan tegangan dan P_e adalah gaya prategang efektif setelah kehilangan tegangan, dengan mensubstitusi r^2 untuk I_c/A_c dan S untuk I_c/C

pada Persamaan (2.6.a) dan Persamaan (2.6.b) maka persamaan-persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi :

a. Tegangan saat transfer

1) Pada serat atas :

$$f_t' = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t'}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S_t'} \quad (2.8.a)$$

2) Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2} \right) + \frac{M_D}{S_b} \quad (2.8.b)$$

b. Tegangan saat layan

1) Pada serat atas :

$$f_t' = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t'}{r^2} \right) - \frac{M_T}{S_t'} \quad (2.9.a)$$

2) Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2} \right) + \frac{M_T}{S_b} \quad (2.9.b)$$

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L \quad (2.10)$$

dengan

P_i : gaya prategang awal sebelum kehilangan gaya prategang (kN)

P_e : gaya prategang efektif setelah kehilangan gaya prategang (kN)

e : eksentrisitas tendon (mm)

C_t' : jarak dari sumbu yang melalui titik berat terhadap sisi atas penampang (mm)

C_b : jarak dari sumbu yang melalui titik berat terhadap sisi bawah penampang (mm)

r : jari-jari putar pada penampang (mm^2)

S^t : modulus penampang serat atas (mm^3)

S_b : modulus penampang serat bawah (mm^3)

M_f : momen total (kN.m)

2.5.4 Tata Letak Tendon

Gaya prategang bekerja di dalam daerah *kern* atau inti penampang tidak akan mengakibatkan terjadinya tegangan tarik pada penampang tersebut. Jarak batas ekstrim geometri *kern* dapat dicari, dimana jarak batas ekstrim bawah (k_b) didapat dengan memberikan nilai tegangan beton tepi atas $f^t = 0$, sehingga persamaannya adalah :

$$f^t = -\frac{P}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C^t}{r^2}\right) = 0 \quad (2.11)$$

dengan demikian $\left(1 - \frac{e \cdot C^t}{r^2}\right) = 0$

karena $e = k_b$, maka $\left(1 - \frac{k_b \cdot C^t}{r^2}\right) = 0$

sehingga $k_b = r^2 / C^t$ (2.12.a)

Dengan cara sama, jarak batas ekstrim atas *kern* (k^t) didapatkan dengan memberikan nilai tegangan beton di tepi bawah, $f_b = 0$, sehingga diperoleh :

$$k^t = -r^2 / C_b \quad (2.12.b)$$

tanda negatif (-) menunjukkan jarak k^t diukur ke arah atas dari bagian netral.

Meskipun bukan keharusan mutlak untuk selalu menempatkan titik berat tendon di dalam *kern*, akan tetapi pengetahuan mengenai batas-batas *kern* merupakan acuan penting dalam merencanakan penampang balok prategang. Pada balok dengan perletakan sederhana terdapat dua penampang kritis, pada tengah dan di ujung bentang, ada kemungkinan eksentrisitas tendon sedemikian rupa sehingga letaknya jatuh di luar *kern*. Sedangkan pada tempat di atas perletakan, titik berat tendon prategang harus terletak di dalam *kern* untuk mencegah terjadinya tegangan tarik pada penampang. Dengan demikian, eksentrisitas letak tendon prategang di sepanjang balok harus diatur sedemikian rupa sehingga tidak mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan yang melampaui tegangan ijin yang diharapkan.

Untuk menentukan batasan-batasan daerah ijin letak tendon sepanjang bentangan balok dapat diperoleh dengan berdasarkan hubungan bahwa eksentrisitas tendon merupakan fungsi dari jarak x di sepanjang bentangan.

Dari Persamaan (2.8.a) :

$$f_u \geq -\frac{P_t}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e(x) \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D \cdot (x)}{S_t}$$

$$e(x) \leq f_t \cdot \left(\frac{S_t}{P_t}\right) + \frac{S_t}{A_c} + \frac{M_D \cdot (x)}{P_t} \quad (2.13)$$

Dari Persamaan (2.8.b) :

$$f_a = -\frac{P_t}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e(x) \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D \cdot (x)}{S_b}$$

$$e(x) \leq -f_a \cdot \left(\frac{S_b}{P_t}\right) - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_D \cdot (x)}{P_t} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.13) dan Persamaan (2.14) di atas memberikan batas bawah eksentrisitas tendon sepanjang bentang komponen.

Dari Persamaan (2.9.a) :

$$f_{cs} \geq -\frac{P_c}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e(x) \cdot C''}{r^2} \right) - \frac{M_T \cdot (x)}{S'}$$

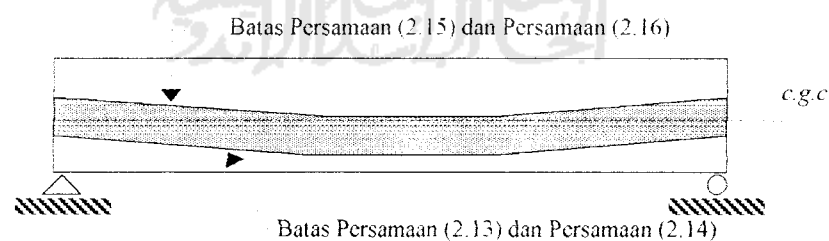
$$e(x) \leq -f_{cs} \cdot \left(\frac{S'}{P_c} \right) + \frac{S'}{A_c} + \frac{M_T \cdot (x)}{P_c} \quad (2.15)$$

Dari Persamaan (2.9.b) :

$$f_{ts} \geq -\frac{P_c}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e(x) \cdot C_b}{r^2} \right) + \frac{M_T \cdot (x)}{S_b}$$

$$e(x) \leq -f_{ts} \cdot \left(\frac{S_b}{P_c} \right) - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_T \cdot (x)}{P_c} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.15) dan Persamaan (2.16) di atas memberikan batas atasnya. Secara umum dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 2.6. yang memberikan rentang daerah ijin letak tendon sepanjang bentang komponen.



Gambar 2.6. Rentang batas letak tendon

2.5.5 Kontrol Tegangan

Akibat dari beban dan gaya yang terjadi pada suatu penampang beton prategang, maka pada masing-masing serat penampang akan terjadi suatu

tegangan. Tegangan-tegangan yang terjadi pada masing-masing serat penampang tersebut tidak boleh melampaui nilai-nilai yang diijinkan. Tegangan ijin beton sesuai SK SNI T- 15 – 1991 – 03 adalah sebagai berikut ini.

1. Sesaat setelah pelimpahan (transfer) gaya prategang

a. Tegangan pada tepi desak, $f_{ct} : 0.60 f_{ct}$ (2.17.a)

b. Tegangan pada tepi tarik, $f_{tt} : \frac{1}{4} \sqrt{f'_{ct}}$ (2.17.b)

2. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya prategang

a. Tegangan pada tepi desak, $f_{cs} : 0.45 f'_c$ (2.18.a)

b. Tegangan pada tepi tarik, $f_{ts} : \frac{1}{2} \sqrt{f'_c}$ (2.18.b)

Persamaan-persamaan yang dipakai untuk mengendalikan agar tegangan di sepanjang komponen tidak melampaui nilai tegangan ijin adalah :

1. Tegangan saat transfer

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_i}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S_t} \leq f_{tt} \quad (2.19.a)$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ct} \quad (2.19.b)$$

2. Tegangan saat layan

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S_t} \leq f_{tt} \quad (2.20.a)$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \leq f_{cs} \quad (2.20.b)$$

2.6 Lendutan

2.6.1 Umum

Lendutan didefinisikan sebagai perubahan posisi suatu titik dari batang sebelum bekerjanya beban sampai beban itu bekerja. Pada suatu konstruksi baik pada beton bertulang maupun beton prategang, masalah lendutan ini harus dicermati secara serius, karena kemampuan layanan (*serviceability*) suatu struktur ditentukan oleh masalah lendutan.

Lendutan pada balok prategang berbeda dengan balok bertulang biasa. Pada lendutan balok bertulang biasa hanya dipengaruhi oleh beban yang bekerja padanya selain faktor susut dan rangkai pada lendutan jangka panjang. Pada balok beton prategang lendutan yang terjadi selain dipengaruhi beban yang bekerja, juga dipengaruhi oleh gaya prategang yang bekerja. Lendutan akibat gaya prategang ini dapat digunakan dengan lebih menguntungkan untuk menghasilkan lendutan ke atas (*camber*) yang diinginkan dan menggeser lendutan akibat beban, asalkan lendutan ke atas ini dapat dikontrol.

Secara umum lendutan dibedakan atas dua bagian, yaitu :

1. lendutan jangka pendek, yang terjadi segera setelah beban bekerja,
2. lendutan jangka panjang, yang terjadi setelah perkembangan waktu.

Terdapat faktor-faktor yang tergantung pada waktu dapat memperbesar lendutan, seiring dengan bertambahnya waktu, sehingga dalam mendesain suatu struktur harus dievaluasi lendutan jangka pendek (*short-term*), maupun lendutan jangka panjang (*long-term*) agar lendutan ini terjamin dan tidak akan melebihi suatu

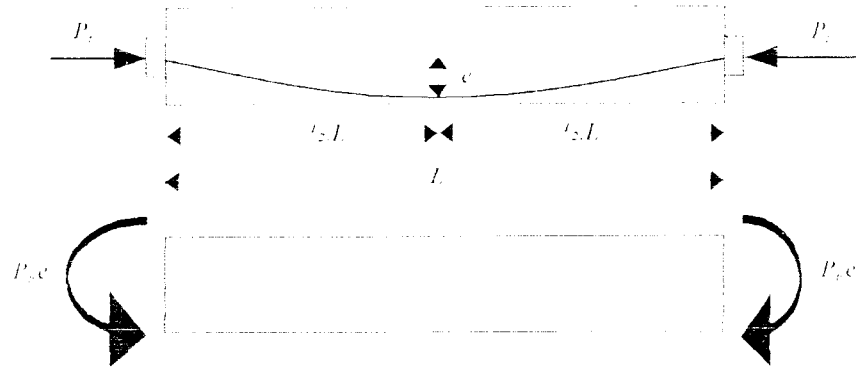
kriteria tertentu. Faktor-faktor yang tergantung waktu ini disebabkan oleh rangkakan (*creep*) dan susut (*shrinkage*) dari beton serta relaksasi (*relaxation*) dari baja.

2.6.2 Lendutan Jangka Pendek (*Short Term*)

Lendutan jangka pendek adalah lendutan yang terjadi segera setelah beban bekerja. Pada balok beton prategang lendutan jangka pendek ini dibedakan menjadi dua bagian, yaitu lendutan ke atas (*camber*) yang diakibatkan oleh gaya prategang dan lendutan akibat berat sendiri balok. Perhitungan lendutan jangka pendek pada balok beton prategang, diasumsikan bahwa sifat penampang beton dianggap sebagai bahan yang elastik dan homogen, walaupun pada kenyataannya modulus elastisitas beton (E_c) tidaklah konstan untuk setiap tegangan, juga modulus elastisitas ini bervariasi seiring dengan umur dari beton itu sendiri dan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain sifat agregat dan semen, kecepatan pembebanan, jenis dan ukuran benda uji.

1. Lendutan ke Atas (*Camber*)

Lendutan ke atas ini diakibatkan oleh gaya prategang yang bekerja. Gaya prategang ini yang terjadi pada baja prategang akan membentuk eksentrisitas (e) terhadap garis normal penampang, yang dengan eksentrisitas ini akan menimbulkan momen sebesar $P_i \cdot e$. Pada Gambar 2.7 diperlihatkan lendutan ke atas atau *camber* dengan gaya prategang yang eksentrisitas terbesarnya pada tengah bentang.

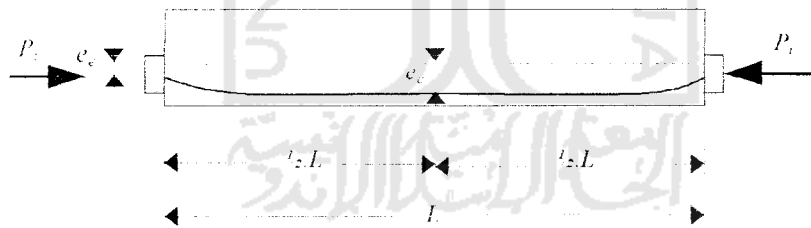


Gambar 2.7. Diagram momen P_i dengan tendon sentris

Lendutan ke atas (*camber*) ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$\delta_{pi} = \frac{P_i \cdot e \cdot L^2}{8 \cdot E_c \cdot I_g} \quad (\uparrow) \quad (2.21)$$

Untuk tendon yang letaknya terhadap pusat berat penampang mempunyai eksentrisitas seperti terlihat pada Gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8. Tendon eksentris

Persamaan lendutan ke atas (*camber*) untuk letak tendon yang mempunyai eksentrisitas seperti Gambar 2.8 adalah :

$$\delta_{pi} = \frac{P_i \cdot L^2}{8 \cdot E_c \cdot I_g} \cdot [e_c + 5/6 \cdot (e_c - e_e)] \quad (\uparrow) \quad (2.22)$$

dengan

δ_{pi} : lendutan yang diakibatkan gaya prategang (mm)

P_i : gaya prategang awal pada saat transfer (kN)

e_c : eksentrisitas tendon pada tengah bentang (mm)

e_e : eksentrisitas tendon pada ujung bentang (mm)

L : panjang bentang (m)

E_c : modulus elastisitas beton (Mpa)

I_g : momen inersia bruto penampang (mm⁴)

2. Lendutan Akibat Beban Mati

Lendutan akibat beban mati di sini adalah lendutan yang diakibatkan oleh beban mati penampang balok itu sendiri. Karena berat sendiri dari balok prategang, maka di tengah bentang pada tumpuan sederhana akan terjadi momen sebesar $1/8 \cdot q \cdot L^2$. Momen pada tengah bentang ini akan menimbulkan lendutan yang diakibatkan oleh beban mati akibat berat sendiri balok sebesar :

$$\delta_D = \frac{5 \cdot M_D \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_g} \quad (\downarrow) \quad (2.23)$$

2.6.3 Lendutan Jangka Panjang (*Long Term*)

Pada balok beton prategang perhitungan lendutan jangka panjang (*long-term*) yang terjadi akan dipengaruhi oleh lendutan sesaat (lendutan jangka pendek), rangkai beton, susut beton, relaksasi baja, dan kehilangan gaya prategang yang dipengaruhi waktu.

Nawy (1990) memberikan persamaan untuk memprediksi lendutan jangka panjang sesuai lama pembebanan beton prategang dengan memperhitungkan parameter-parameter yang mempengaruhinya adalah sebagai berikut ini.

a. Akibat beban mati:

$$\delta_{SD} = \frac{5 \cdot M_{SD} \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_c} \quad (\downarrow) \quad (2.24)$$

b. Akibat beban hidup :

$$\delta_L = \frac{5 \cdot M_L \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_c} \quad (\downarrow) \quad (2.25)$$

Total lendutan yang terjadi pada akhir umur rencana :

$$\begin{aligned} \delta_{L,t} = \delta_{Pr} - \delta_D + \left[-\frac{\Delta P}{P_i} + \lambda \cdot k_r \cdot C_t + \left(1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_i} \right) \right] \cdot \delta_{Pr} - (k_r \cdot C_t) \cdot \delta_D \\ - \delta_{SD} - (k_r \cdot C_t \cdot \beta_s) \cdot \delta_{SD} - \delta_L \end{aligned} \quad (2.26)$$

dengan

δ_{Pr} : lendutan ke atas akibat gaya prategang

ΔP : total kehilangan gaya prategang minus kehilangan elastis beton dikalikan dengan luasan kabel tendon.

P_i : gaya prategang pada saat transfer

δ_{SD} : lendutan akibat beban mati

δ_D : lendutan akibat berat sendiri balok

δ_L : lendutan akibat beban hidup

C_t : koefisien rangkai pada waktu t

β_s : faktor yang berhubungan dengan umur beton

$$= 1.25 t^{-0.118} \text{ untuk beton yang dirawat basah}$$

$$= 1.13 t^{-0.095} \text{ untuk beton yang dirawat dengan uap panas}$$

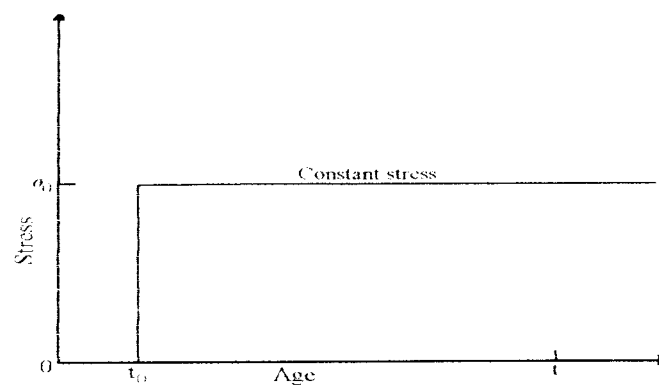
$$\lambda = 1 - \Delta P / 2P_i$$

$$k_r \approx 1.0$$

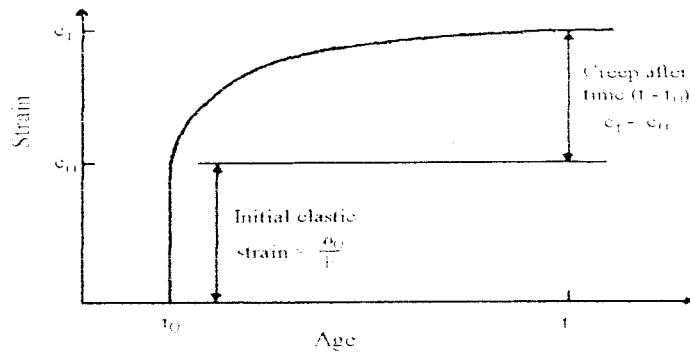
1. Rangkak pada Beton

Beton merupakan material yang bersifat elastis apabila dibebani dalam waktu yang pendek, karena regangan yang ditimbulkan masih bersifat elastis, artinya apabila beban dihilangkan atau ditiadakan maka regangannya akan kembali seperti keadaan semula. Sedangkan regangan yang terjadi pada waktu beton menerima pembebanan tetap akan bertambah perlahan-lahan sejalan dengan waktu, hal ini disebabkan sebagian oleh rangkak beton, sehingga beton bersifat in-elastis.

Rangkak beton (*creep*) adalah besarnya regangan tambahan pada suatu struktur beton yang mengalami regangan konstan, yang diukur dari regangan elastis sampai regangan yang terjadi pada saat tertentu (Nawy,1990). Jadi regangan rangkak merupakan regangan yang terjadi karena fungsi waktu, sedangkan tegangan yang pada struktur tersebut adalah konstan. Hubungan antara tegangan (σ) dan waktu (t) pada definisi rangkak tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9, sedangkan regangan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.10 mengenai hubungan regangan (ε) dan waktu (t).



Gambar 2.9. Hubungan antara tegangan (σ) dan waktu (t) pada definisi rangkak (Nevile, 1985)



Gambar 2.10. Hubungan antara regangan (ϵ) akibat fungsi waktu (t) (Nevile, 1985)

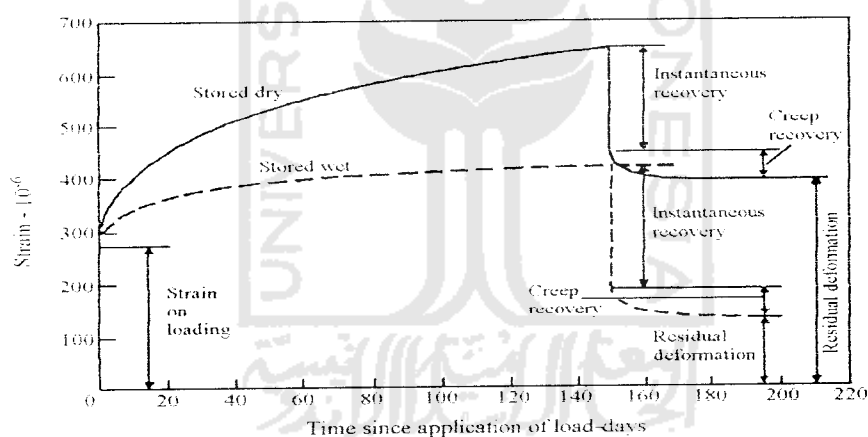
Dari Gambar 2.10 di atas terlihat bahwa akibat rangkai beton regangan akan bertambah besar, akan tetapi kecepatan pertambahan regangannya akan berkurang menurut waktu.

Untuk mengukur besarnya rangkai beton dilakukan percobaan dengan memakai contoh beton dalam kondisi temperatur dan kelembaban konstan serta diberi pembebanan tetap. Pada waktu struktur beton dibebani dengan beban tetap, seketika akan terjadi regangan elastis yang kemudian diikuti oleh regangan rangkai dan susut. Regangan elastis sesungguhnya akan berkurang besarnya sejalan dengan waktu karena modulus elastisitas beton (E_c) adalah fungsi dari kekuatan beton (f'_c), dimana harga f'_c akan bertambah menurut waktu. Pernyataan ini dapat dirumuskan sebagai :

$$\epsilon_c = \frac{f'_c}{E_c} \quad (2.27)$$

Bila modulus elastisitas beton (E_c) bertambah, maka regangan beton (ϵ_c) akan berkurang. Untuk memudahkan dalam perhitungan modulus elastisitas ini biasanya dihitung berdasarkan kekuatan beton (f'_c) pada umur beton 28 hari.

Apabila pembebanan pada struktur beton dihilangkan atau diadakan *unloading* pada waktu t_1 maka regangan elastis seketika akan kembali, tetapi tidak sebesar regangan elastis mula-mula. Regangan pemulihan elastis seketika kembali pada waktu beban dihilangkan disebut pemulihan elastis seketika (*instantaneous recovery*). *Instantaneous recovery* ini diikuti oleh berkurangnya regangan secara perlahan-lahan yang sejalan dengan waktu. Kejadian ini disebut *creep recovery* atau pemulihan rangkak, yang relatif kecil dibandingkan dengan regangan rangkak total, dan sisa regangan yang tidak kembali disebut *residual permanent deformations*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11. Kurva hubungan antara deformasi dengan waktu pembebanan (Nevile, 1985)

Pengaruh yang nyata akibat rangkak adalah lenturan-lenturan yang bertambah seiring dengan bertambahnya waktu. Deformasi oleh rangkak yang tidak elastis ini bertambah dengan tingkat perubahan yang berkurang selama pembebanan, dan jumlah totalnya dapat mencapai besar yang beberapa kali dari deformasi elastis dalam jangka pendek.

Menurut *ACI Comitte 209*, regangan rangkak beton dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

- a. Rangkak dasar (*basic creep*),
- b. Rangkak kering (*drying creep*).

Basic Creep adalah rangkak beton yang terjadi pada kondisi yang tidak terjadi perubahan kadar udara dan sifatnya tidak dipengaruhi oleh kelembapan relatif di sekeliling beton tersebut. *Drying creep* adalah rangkak tambahan yang terjadi karena proses pengeringan yang berhubungan dengan susut beton dan sifatnya tergantung pada kelembaban, temperatur sekeliling serta dimensi dari suatu struktur.

Rangkak adalah fenomena yang sangat bervariasi, karena rangkak dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya deformasi rangkak adalah sebagai berikut ini.

- a. Pemilihan bahan dasar, seperti susunan dari semen, bahan campuran, ukuran susunan butir dan isi zat-zat mineral dari agregat.
- b. Proporsi, seperti kadar air dan perbandingan air semen.
- c. Suhu dan derajat kebasahan sewaktu pengeringan beton.
- d. Kelembaban nisbi selama penyimpanan.
- e. Ukuran dari anggota struktur, khususnya tebal dan perbandingan volume terhadap permukaan.
- f. Umur pada waktu pembebanan.
- g. Nilai slump

1) Pemilihan bahan dasar seperti susunan dari semen, bahan campuran, ukuran susunan butir dan isi zat-zat mineral

Pada dasarnya pemilihan bahan dasar semen akan mempengaruhi tipe semen, sedangkan tipe semen yang dipakai pada suatu struktur beton akan mempengaruhi besarnya kekuatan beton pada waktu pembebanan. Deformasi rangkak (*creep deformation*) tergantung pada kekuatan beton pada saat dibebani. Besar rangkak berbanding terbalik dengan kekuatan beton. Ukuran susunan butir semen akan mempengaruhi perkembangan kekuatan beton pada kondisi awal. Makin tinggi derajat kehalusan semen semakin besar nilai rangkaknya. Dengan penambahan agregat nilai rangkak yang terjadi akan menjadi lebih kecil, pengurangan rangkak yang terjadi akibat pengaruh dari penambahan agregat sangat bervariasi pada tipe agregat yang digunakan.

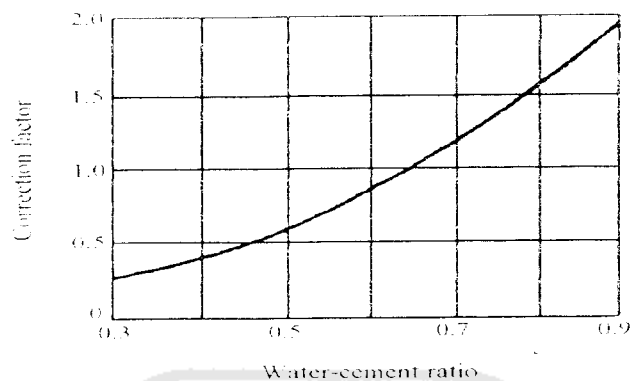
Pengaruh pengurangan campuran air (*admixture water reducing*) dan *set retarding* pada rangkak akan memperbesar deformasi rangkak. Oleh sebab itu sangat penting melakukan pengontrolan pengaruh campuran yang ditambahkan pada campuran beton.

2) Kondisi *Curing*

Yang dimaksud dengan kondisi *curing* disini adalah temperatur dari beton *curing*. Temperatur sangat mempengaruhi besar rangkak yang terjadi, bahwa beton di bawah pembebanan dengan temperatur yang berbeda akan menghasilkan regangan rangkak yang berbeda pula.

3) Faktor Air Semen

Makin besar faktor air semen, maka akan memperendah mutu beton sehingga akan memperbesar rangkak yang terjadi, seperti yang terlihat pada Gambar. 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12 Pengaruh faktor air semen terhadap rangkai pada struktur beton (Nevile, 1985)

4) Kelembaban Relatif di Sekelilingnya Selama Umur Pembebanan Struktur

Selain kondisi dari struktur, faktor luar juga mempengaruhi besarnya rangkai beton. Salah satu faktor luar yang mempengaruhi besarnya rangkai adalah kelembaban relatif di sekeliling struktur, bahwa semakin tinggi kelembaban relatif di sekeliling beton, semakin kecil regangan rangkai yang terjadi.

5) Umur pada Saat Pembebanan

Pembebanan beton pada waktu beton masih muda akan memperbesar terjadinya rangkai, karena saat itu kekuatan beton masih rendah. Penambahan umur beton pada awal pembebanan akan mengurangi regangan rangkai yang terjadi, karena kekuatan beton bertambah besar dengan bertambahnya waktu (umur beton).

6) Lama Pembebanan

Pertambahan besarnya regangan rangkak akan berkurang sejalan dengan lamanya waktu pembebanan, semakin lama pembebanan maka akan semakin kecil pula besarnya pertambahan besarnya rangkak.

7) Perbandingan Volume dengan Luas Permukaan

Rangkak yang terjadi akan berkurang dengan bertambahnya dimensi dari suatu struktur beton. Pengaruh bentuk dan dimensi dari suatu struktur beton dalam perbandingan volume dengan luas permukaan, bila semakin besar perbandingannya maka besarnya rangkak yang terjadi akan semakin kecil.

Bila nilai slump suatu beton besar akan terjadi semakin rendah mutu beton yang didapat, dengan demikian secara tidak langsung akan mempengaruhi nilai rangkak yang terjadi. Semakin besar nilai slump maka nilai rangkak yang terjadi semakin besar pula.

Persamaan untuk memprediksi nilai koefisien rangkak yang diajukan oleh Branson (1977), adalah :

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \cdot C_u \quad (2.28)$$

dengan

C_t : koefisien rangkak pada waktu t (dalam hari)

C_u : koefisien rangkak batas (*ultimate creep coefficient*) = 2.35 K

K : koefisien koreksi untuk rangkak

= 1.0 apabila dalam kondisi standar

Tabel 2.1. Faktor yang mempengaruhi rangkai pada beton dalam kondisi standar

Keterangan	Kondisi Standar
tipe semen	tipe I dan III
slump beton	2.7 in
kadar udara	< 6 %
kehalusan agregat	50 %
kadar semen	278 – 446 kg/m ³
<i>initial moist curing</i>	7 hari
kelembaban relatif	40 %
temperatur beton	23 ± 2 °C

Sumber : *ACI Commite 209*

Untuk kondisi di luar standar, maka harus dikalikan dengan faktor koreksi.

Faktor koreksi-koreksi yang mempengaruhinya rangkai pada beton antara lain:

1) Umur Beton Saat Pembebanan (K_{T0})

a. Untuk beton dirawat dengan pembasahan (*moist cured concrete*)

$$K_{T0} = 1.258 (t)^{-0.118} \quad (2.29.a)$$

b. Untuk beton yang dirawat dengan uap panas (*steam cured concrete*)

$$K_{T0} = 1.13 (t)^{-0.095} \quad (2.29.b)$$

dengan t adalah umur saat pembebanan.

2) Kelembaban Relatif (K_H)

$$K_H = 1.27 - 0.0067 H \quad (\text{untuk } H > 40 \%) \quad (2.30)$$

dengan H adalah kelembaban relatif dalam persen.

3) Ratio Penampang (K_T)

$$K_T = 1.12 - 0.8 v.s \quad (\text{untuk } v.s > 1.5 \text{ inch}) \quad (2.31)$$

4) Nilai Slump Beton (K_S)

$$K_S = 0.82 + 0.67 S \quad (2.32)$$

dengan S adalah nilai slump beton (inch)

5) Kadar Agregat (K_F)

$$K_F = 0.88 + 0.0024 F \quad (2.33)$$

dengan F adalah kadar agregat terhadap berat dalam persen.

6) Kadar Udara (K_A)

$$K_A = 1.00 \quad (\text{untuk } A < 6 \%) \quad (2.34.a)$$

$$K_A = 0.46 + 0.008 A \quad (\text{untuk } A > 6 \%) \quad (2.34.b)$$

dengan A adalah kadar udara dalam persen

Persamaan koefisien rangkai batas untuk kondisi di luar standar adalah :

$$C_u = 2.35 \cdot K_{TO} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_F \cdot K_A \quad (2.35)$$

2. Susut pada Beton

Beton adalah suatu bahan struktur yang kuat dan padat yang merupakan hasil campuran dari partikel-partikel yang dilekatkan oleh pasta yang terbuat dari *cement portland* dan air. Pasta itu mengisi ruang-ruang yang kosong di antara partikel-partikel agregat, dan setelah beton dicorkan, maka campuran itu mengeras akibat dari reaksi-reaksi kimia eksotermis antara semen dan air. Pada waktu mencapai kondisi kuat dan padat tersebut, beton mengalami perubahan volume, hal ini diakibatkan oleh reaksi kimia dan hidrasi, serta penguapan air campuran yang tidak terikat oleh semen.

Pada dasarnya susut dibagi atas dua bagian :

- a. susut plastis,
- b. susut pengeringan.

Susut plastis adalah susut yang terjadi beberapa jam setelah beton segar dicor ke dalam acuan. Permukaan yang diekspos seperti pelat lantai akan lebih dipengaruhi oleh udara kering karena adanya bidang kontak yang luas. Dalam hal demikian terjadi penguapan yang lebih cepat melalui permukaan beton dibandingkan dengan pergantian air dari lapisan beton yang lebih bawah. Susut pengeringan adalah susut yang terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi semen telah selesai.

Fenomena sebaliknya, yaitu penambahan volume karena penyerapan air yang disebut dengan *swelling*. Dengan perkataan lain susut dan *swelling* menunjukkan adanya perbedaan kelembaban atau perbedaan kejenuhan di antara elemen-elemen yang berdekatan. Fenomena ini tidak tergantung pada beban luar yang terjadi. Laju perubahan susut ini berkurang terhadap waktu, karena beton yang semakin berumur akan semakin tahan tegangan dan semakin sedikit mengalami susut. Susut biasanya dinyatakan dengan regangan susut (ϵ_{sh}) yang nilainya sangat bervariasi dan sangat tergantung pada bahan yang digunakan sebagai campuran beton dan perawatan beton itu sendiri.

Susut seperti pada rangkai merupakan fenomena yang sangat bervariasi dan ditentukan oleh banyak faktor. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut ini.

1) Agregat.

Agregat berlaku sebagai penahan susut pada beton. Jadi, beton dengan kandungan agregat yang semakin tinggi akan semakin berkurang perubahan volumenya akibat susut. Lagi pula derajat ketahanan beton ditentukan oleh sifat agregatnya, yaitu dengan modulus elastisitas yang tinggi atau dengan permukaan yang kasar akan lebih tahan terhadap proses susut.

2) Faktor air semen.

Semakin besar faktor air semen, akan semakin besar pula efek susutnya.

3) Ukuran elemen beton.

Kelanjutan dan besarnya susut akan berkurang apabila volume betonnya semakin besar. Akan tetapi terjadinya susut akan semakin lama untuk elemen yang lebih besar karena lebih banyak waktu yang diperlukan untuk pengeringan sampai ke bagian dalam. Sebagai contoh mungkin diperlukan waktu sampai satu tahun untuk mencapai pengeringan pada kedalaman 10 inch dari permukaan luar dan sepuluh tahun untuk mencapai 24 inch dari permukaan luar.

4) Kondisi lingkungan.

Kelembaban relatif di sekeliling beton sangat mempengaruhi besarnya susut, laju perubahan susut semakin kecil pada lingkungan dengan kelembaban relatif tinggi. Temperatur di sekeliling juga merupakan faktor yang menentukan, yaitu susut akan tertahan pada temperatur rendah.

5) Banyaknya penulangan.

Beton bertulang lebih sedikit susutnya dibandingkan dengan beton sederhana, perbedaan relatifnya merupakan fungsi dari persentase tulangan.

6) Bahan tambahan pada campuran beton.

Pengaruh ini sangat bervariasi bergantung pada bahan tambahan yang digunakan. Aselelarator seperti kalsium klorida digunakan untuk mempercepat proses pengerasan beton dan memperbesar susut. Pozzolon juga dapat menambah susut, sedangkan bahan *air-entraining* hanya mempunyai sedikit pengaruh terhadap susut.

7) Jenis semen.

Susut karbonasi disebabkan oleh adanya reaksi antara karbondioksida (CO_2) yang ada di udara dan yang ada dalam pasta semen. Besarnya susut karbonasi bervariasi, bergantung pada urutan kejadian antara proses susut karbonasi dan susut pengeringan. Jika kedua fenomena ini terjadi bersamaan maka susut yang terjadi lebih kecil. Berbeda dengan proses susut pengeringan proses karbonasi sangat berkurang pada kelembaban relatif di bawah 50 %.

Untuk memprediksi nilai rangkai, Branson (1977) memberikan suatu persamaan koefisien regangan susut pada keadaan standar.

- a) Untuk waktu t setelah umur 7 hari dari beton yang dikeringkan dengan udara (*moist cured concrete*)

$$\varepsilon_{SH} = \frac{t}{35 + t} \cdot (\varepsilon_{SH})_L \quad (2.36.a)$$

- b) Untuk waktu t setelah 1 sampai 3 hari dari beton yang dikeringkan dengan uap panas (*steam cured concrete*).

$$\varepsilon_{SH} = \frac{t}{55 + t} \cdot (\varepsilon_{SH})_L \quad (2.36.b)$$

dengan

ε_{SH} : regangan susut pada waktu setelah pengerasan

t : waktu setelah pengerasan awal (dalam hari)

$(\varepsilon_{SH})_L$: regangan susut batas

$$= 820 \times 10^{-6} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_F \cdot K_A \quad (\text{inch} / \text{inch}) \text{ untuk } \textit{moist} \\ \textit{cured concrete}$$

$$= 730 \times 10^{-6} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_F \cdot K_A \text{ untuk steam cured concrete}$$

Untuk kondisi di luar standar, maka harus mengalikan semua faktor koreksi yang mempengaruhinya. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut ini.

1) Kelembaban Relatif (K_H)

$$K_H = 1.4 - 0.01 H \quad (\text{untuk } 40 \% < H < 80 \%) \quad (2.37.a)$$

$$K_H = 3.00 - 0.03 H \quad (\text{untuk } 80 \% < H < 100 \%) \quad (2.37.b)$$

dengan H adalah kelembaban relatif (dalam persen)

2) Rasio Penampang (K_P)

$$K_P = 1.14 - 0.009 v_s \quad (\text{untuk } v_s > 1.5) \quad (2.38)$$

dengan v_s adalah rasio penampang (dalam inch)

3) Nilai Slump Beton (K_S)

$$K_S = 0.89 - 0.041 S \quad (2.39)$$

dengan S adalah nilai slump (dalam inch)

4) Berat Semen (K_B)

$$K_B = 0.75 + 0.034 B \quad (2.40)$$

dengan B adalah berat semen dalam satu sak (lb)

5) Agregat Halus (K_F)

$$K_F = 0.30 + 0.014 F \quad (\text{untuk } F < 50 \%) \quad (2.41.a)$$

$$K_F = 0.90 + 0.020 F \quad (\text{untuk } F > 50 \%) \quad (2.41.b)$$

dengan F adalah perbandingan agregat terhadap berat (dalam persen)

6) Kadar Udara (K_A)

$$K_A = 0.95 + 0.008 A \quad (2.42)$$

dengan A adalah kadar udara (dalam persen)

2.6.4 Kehilangan Tegangan Tendon

1. Akibat Pengangkuran

Untuk kebanyakan sistem *post tensioned*, pada saat tendon ditarik sampai nilai yang penuh dongkrak dilepas dan gaya prategang dialihkan ke angkur. Perlengkapan di dalam angkur yang mengalami tegangan pada saat peralihan cenderung untuk berdeformasi, jadi tendon dapat tergelincir sedikit. Besarnya nilai gelincir ini rata-rata 2.5 mm.

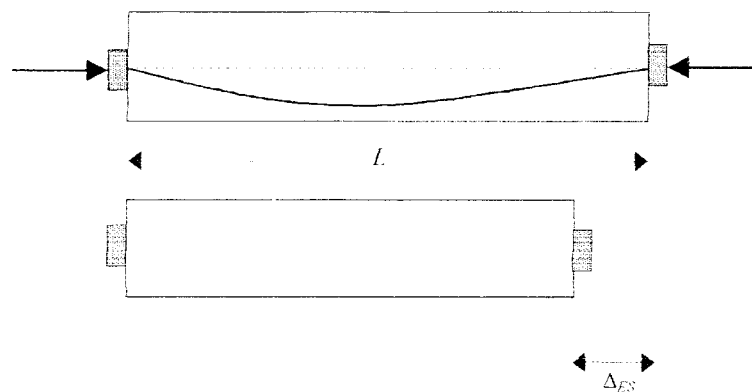
Lin dan Burns (1993) memberikan rumus umum untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran, yaitu :

$$\Delta f_{p-AN} = \frac{\Delta_a \cdot E_{ps}}{L} \quad (2.43)$$

dengan Δ_a : besarnya penggelinciran (mm)

2. Akibat Deformasi Elastis Beton

Pada saat gaya prategang ditransfer ke beton, komponen struktur akan memendek seiring dengan memendeknya baja akibat dilepaskannya tendon dari alat penarik (*jacking*). Pertama-tama ditinjau perpendekan beton searah sumbu yang hanya diakibatkan oleh gaya prategang.



Gambar 2.13 Perpendekan elastis beton

Persamaan regangan elastis pada beton adalah :

$$\varepsilon_{ES} = \Delta_{ES} / L \quad (2.44)$$

Kehilangan tegangan :

$$\Delta f_{p-ES} = E_{ps} \cdot \varepsilon_{ES} = \frac{E_{ps} \cdot P_t}{A_c \cdot E_c} = \frac{n \cdot P_t}{A_c} = n \cdot f_{cs} \quad (2.45)$$

Untuk kondisi akibat pengaruh momen-momen yang terjadi maka nilai

$$f_{cs} = \frac{P_t}{A} \cdot \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D \cdot e}{I} \quad (2.46)$$

Rekomendasi ACI-ASCE dalam Lin dan Burns (1993), untuk kehilangan elastik beton memperhitungkan pengaruh penarikan berturut-turut pada kehilangan elastik, maka kehilangan gaya prategang menjadi :

$$\Delta f_{p-ES} = K_{ES} \cdot n \cdot f_{cs} \quad (2.47)$$

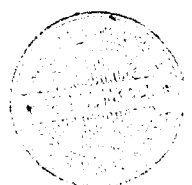
dengan

$$\begin{aligned} K_{ES} &= 1.0 \text{ untuk komponen struktur } \textit{pretensioned} \\ &= 0.5 \text{ untuk komponen struktur } \textit{post tensioned} \text{ bila kabel-kabel secara} \\ &\quad \text{berturut-turut ditarik dengan gaya yang sama} \end{aligned}$$

n : rasio modulus pada saat peralihan

3. Akibat Gesekan

Gesekan yang terjadi pada sistem pendongkrakan dan pengangkutan umumnya kecil meskipun bukan tak berarti. Harus diingat bahwa jumlah penarikan yang berlebihan harus dibatasi agar tetap berada di dalam titik leleh kawat. Peraturan ACI memberikan gaya dongkrak sampai $0.80 f_{pu}$. Kehilangan gaya prategang lebih serius terjadi di antara tendon dan bahan-bahan sekelilingnya



baik itu berupa beton atau selubung (*sheathing*), dan apakah diberi pelumas atau tidak. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini dapat dipertimbangkan pada dua bagian, yaitu pengaruh panjang dan kelengkungan.

Pengaruh panjang adalah jumlah gesekan yang akan dijumpai jika tendon lurus, tidak dirancang bengkok atau melengkung. Karena dalam praktek selubung beton tidak dapat lurus sepenuhnya, gesekan akan ada di antara tendon dan bahan sekelilingnya meskipun tendon dimaksudkan harus lurus. Hal ini dijelaskan sebagai pengaruh turun naiknya selubung (*wobbling effect*) tergantung dari panjang dan tegangan tendon, koefisien gesekan antara bahan yang bersentuhan, dan keterampilan pekerja dan metode yang digunakan dalam meluruskan selubung.

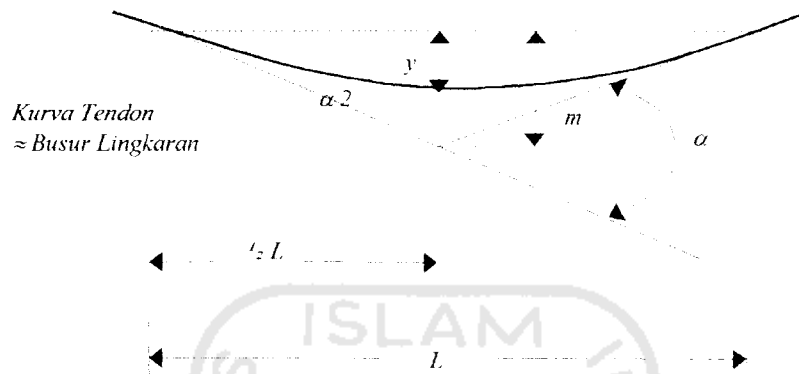
Beberapa nilai pendekatan untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini diberikan pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon-tendon *post tensioned*

Tipe Tendon	Koefisien Wobble K tiap meter	Koefisien Kelengkungan μ
Tendon pada selubung logam fleksibel		
Tendon kawat	0.0033-0.0049	0.15-0.25
Strand dengan untaian 7-kawat	0.0016-0.0066	0.15-0.25
Batang baja mutu tinggi	0.0003-0.0020	0.08-0.30
Tendon pada selubung logam kaku		
Strand dengan untaian 7-kawat	0.0007	0.15-0.25
Tendon yang diminyaki terlebih dahulu		
Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat	0.001-0.0066	0.05-0.15
Tendon yang diberi lapisan mastik		
Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat	0.0033-0.0066	0.05-0.15

Sumber : **Pembahasan Peraturan ACI (Lin dan Burns, 1993)**

Sebagai pertimbangan praktis dalam mencari nilai pendekatan kehilangan gaya prategang akibat gesekan sepanjang kurva tendon dapat ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14. Pendekatan sudut pusat tendon

Lin dan Burns (1993) memberikan persamaan untuk memprediksi kehilangan gaya prategang akibat gesekan sebagai berikut :

$$\Delta f_{pv} = f_{pi} \cdot [(\mu \cdot \alpha) + (K \cdot L)] \quad (2.48)$$

dengan

α : sudut yang dibentuk tendon

$$= \frac{8 \cdot e}{L} \quad (\text{radian})$$

μ : koefisien kelengkungan tendon

K : koefisien naik turun selubung tendon

4. Akibat Rangkaian pada Beton

Rangkaian pada beton didefinisikan sebagai perubahan regangan yang terjadi pada beton yang mengalami tegangan konstan. Seperti halnya dengan susut, yang disebabkan oleh perubahan kelembaban relatif beton. Selain itu, untuk beton

baik itu berupa beton atau selubung (*sheathing*), dan apakah diberi pelumas atau tidak. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini dapat dipertimbangkan pada dua bagian, yaitu pengaruh panjang dan kelengkungan.

Pengaruh panjang adalah jumlah gesekan yang akan dijumpai jika tendon lurus, tidak dirancang bengkok atau melengkung. Karena dalam praktek selubung beton tidak dapat lurus sepenuhnya, gesekan akan ada di antara tendon dan bahan sekelilingnya meskipun tendon dimaksudkan harus lurus. Hal ini dijelaskan sebagai pengaruh turun naiknya selubung (*wobbling effect*) tergantung dari panjang dan tegangan tendon, koefisien gesekan antara bahan yang bersentuhan, dan keterampilan pekerja dan metode yang digunakan dalam meluruskan selubung.

Beberapa nilai pendekatan untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini diberikan pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon-tendon *post tensioned*

Tipe Tendon	Koefisien Wobble K tiap meter	Koefisien Kelengkungan μ
Tendon pada selubung logam fleksibel		
Tendon kawat	0.0033-0.0049	0.15-0.25
Strand dengan untaian 7-kawat	0.0016-0.0066	0.15-0.25
Batang baja mutu tinggi	0.0003-0.0020	0.08-0.30
Tendon pada selubung logam kaku		
Strand dengan untaian 7-kawat	0.0007	0.15-0.25
Tendon yang diminyaki terlebih dahulu		
Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat	0.001-0.0066	0.05-0.15
Tendon yang diberi lapisan mastik		
Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat	0.0033-0.0066	0.05-0.15

saat diberikan gaya prategang dan jenis beton yang digunakan akan turut mempengaruhi besarnya rangkak yang terjadi. Dalam balok beton prategang, tekanan yang menyebabkan rangkak tidak konstan. Tetapi berkurang dengan bertambahnya waktu akibat relaksasi tegangan baja dan susut beton. Hal tersebut menyebabkan perubahan panjang yang berkaitan dengan rangkak itu sendiri.

Tegangan beton yang dijadikan dasar dalam perhitungan kehilangan tegangan akibat rangkak adalah tegangan beton pada posisi baja, sedangkan rangkak dianggap terjadi setelah penambahan beban mati permanen pada elemen struktur setelah beton diberi gaya prategang. Sehingga resultan dari regangan tekan awal akibat gaya prategang yang terjadi segera setelah transfer dan regangan tarik akibat beban mati permanen merupakan variabel yang digunakan dalam perhitungan rangkak. Kehilangan tegangan akibat rangkak untuk elemen struktur dengan tendon yang terekat dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$\Delta f_{p-CR} = n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \quad (2.49)$$

dengan:

$K_{CR} = 2.0$ untuk elemen struktur pratarik

$K_{CR} = 1.6$ untuk elemen struktur pasca tarik

f_{cs} : tegangan beton di posisi baja setelah transfer

f_{csd} : tegangan beton di posisi baja akibat penambahan beban mati tambahan

$$= \frac{M_{SD} \cdot e}{I} \quad (2.50)$$

n : rasio modulus elastis

$$= E_{ps} / E_c \quad (2.51)$$

5. Akibat Susut Beton

Susut pada beton dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti rangkai, dalam perhitungan-perhitungan kehilangan gaya prategang dari sumber ini akan menggambarkan yang mana hal-hal paling penting, yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaan, kelembaban relatif dan waktu dari akhir perawatan sampai dengan bekerjanya gaya prategang.

Kehilangan gaya prategang akibat susut beton dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut :

$$\Delta f_{p-SH} = \epsilon_{SH} \cdot E_{ps} \quad (2.52)$$

dengan :

ϵ_{SH} : regangan susut yang dipengaruhi faktor koreksi

E_{ps} : modulus elastisitas tendon

Seperti halnya rangkai, terdapat variasi terhadap besarnya nilai regangan. Untuk perhitungan diambil regangan susut rata-rata sebesar 550×10^{-6} in/in. Dan faktor-faktor seperti perbandingan volume terhadap luas permukaan (v/s) dan kelembaban relatif (RH) akan sangat berpengaruh pada besarnya nilai regangan susut. Besarnya regangan susut beton dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \epsilon_{SH} &= 550 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.06 \cdot v/s) \cdot (1.5 - 0.015 \cdot RH) \\ &= 8.2 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.06 \cdot v/s) \cdot (100 - RH) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Untuk berbagai kondisi perawatan dan faktor yang mempengaruhi besarnya regangan susut dapat dihitung dengan Persamaan (2.26.a) sampai (2.31.b). Untuk elemen struktur *post tensioned* pengangkutan tendon dilakukan setelah sebagian

susut beton terjadi. Hal ini menguntungkan karena terdapat reduksi terhadap besarnya kehilangan tegangan akibat susut, maka Persamaan (2.47) dikoreksi dengan faktor K_{SH} untuk elemen struktur *post tensioned*. Besarnya nilai-nilai K_{SH} dapat dilihat pada Tabel 2.3, sehingga besarnya kehilangan tegangan akibat susut beton dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta f_{p-SH} = \epsilon_{SH} \cdot K_{SH} \cdot E_{ps} \quad (2.54)$$

Tabel 2.3 Nilai K_{SH} untuk elemen *post tensioned*

Jangka waktu setelah perawatan basah sampai pada penerapan gaya prategang (hari)	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{SH}	0.92	0.85	0.80	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45

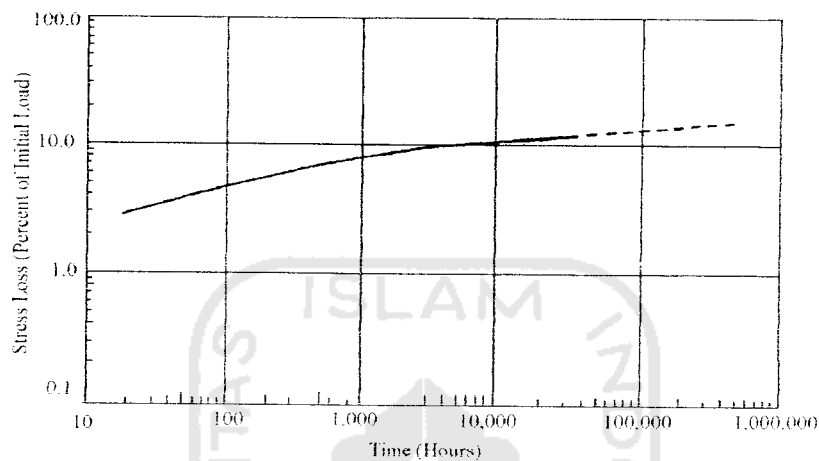
Sumber: T.Y. Lin & Burns (1993)

6. Akibat Relaksasi Baja

Relaksasi didefinisikan sebagai kehilangan tegangan dalam suatu material yang dikenai tegangan dan dijaga pada regangan konstan. Walaupun tidak mengalami regangan konstan, hal ini umumnya disesuaikan pada kondisi yang lebih mendekati regangan konstan. Karena itu studi tentang relaksasi dibuat untuk mengevaluasi kehilangan prategang yang menjadikan perilaku baja tidak elastis.

Tendon prategang yang ditegangkan pada dasarnya mempunyai panjang konstan selama umur struktur. Walaupun ada beberapa reduksi panjang akibat susut dan rangkai beton akan menghasilkan perubahan volume atau panjang yang tak elastis. Sebab tendon yang diangkurkan ke beton dengan rekatan atau ankur ujung, perubahan panjang beton menghasilkan perubahan panjang tendon

sehingga dapat mereduksi kehilangan tegangan akibat relaksasi tegangan baja tergantung pada intensitas tegangan baja maupun waktu.



Gambar 2.15. Kurva kehilangan tegangan terhadap waktu untuk kawat *stress relieved* pada 70% f_{pi} dan dijaga pada panjang konstan dengan suhu 85° F. (Libby, 1987)

Rasio tegangan antara reduksi tegangan f_p dengan tegangan awal f_{pi} dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\frac{f_p}{f_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{10} \cdot \left[\frac{f'_{pi}}{f_{pv}} - 0.55 \right] \quad (2.55)$$

dengan f_{pv} adalah tegangan leleh efektif, t adalah waktu dalam jam setelah penarikan, $\log t$ dengan bilangan dasar sepuluh dan f'_{pi} / f_{pv} tidak kurang dari 0.55.

Sehingga kehilangan tegangan akibat relaksasi baja adalah :

$$\Delta f_{p-RE} = f'_{pi} \left[\frac{\log t}{10} \right] \cdot \left[\frac{f'_{pi}}{f_{pv}} - 0.55 \right] \quad (2.56)$$

2.6.5 Kontrol Lendutan

Defleksi yang diijinkan pada sistem struktur sangat tergantung pada besarnya defleksi yang dapat ditahan oleh komponen-komponen yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estesis dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi. Dapat diterima atau tidaknya besar defleksi merupakan fungsi dari faktor-faktor seperti jenis bangunan, digunakan atau tidaknya partisi, ada atau tidaknya langit-langit, ataupun kepekaan peralatan atau sistem mesin yang ditumpu oleh lantai tersebut, karena pembatasan defleksi harus ada untuk taraf beban kerja, maka struktur-struktur yang dirancang secara konservatif, yaitu tegangan beton dan baja cukup kecil pada umumnya tidak mempunyai masalah dalam hal defleksi.

Struktur-struktur pada masa sekarang dirancang dengan menggunakan prosedur kekuatan batas (*ultimate*), yaitu dengan memanfaatkan kekuatan tinggi baja dengan betonnya, dengan demikian akan diperoleh elemen-elemen struktur yang semakin langsing, dan dalam hal demikian defleksi sesaat maupun jangka panjang sangat perlu dikontrol. Peraturan ACI mensyaratkan bahwa defleksi yang dihitung pada balok atau slab satu arah harus memenuhi persyaratan *serviceability* mengenai defleksi yang diijinkan pada berbagai kondisi struktural, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Angka Perbandingan bentang (L) dengan defleksi (δ) maksimum yang diijinkan

Jenis elemen struktur	Defleksi yang Ditinjau	(L/δ)
Atap datar yang tidak memikul dan padanya tidak terpasang elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar	Defleksi sesaat, akibat beban hidup L	180 ^a
Lantai-lantai yang tidak memikul dan padanya tidak terpasang elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar	Defleksi sesaat akibat beban hidup L	360 ^b
Konstruksi atap atau lantai yang padanya tidak berpasangan elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar	Sebagian dari defleksi total yang terjadi sesudah pemasangan elemen nonstruktural, jumlah dari semua beban <i>sustained</i> ideal ditambah sebagian dari beban hidup yang <i>sustained</i> dan defleksi sesaat akibat suatu beban hidup tambahan.	480 ^c
Konstruksi atap atau lantai yang memikul atau padanya terpasang elemen nonstruktural yang tidak akan rusak defleksi besar		240 ^c

Sumber : Nawy (1990)

- ^a Batas-batas yang ada di sini tidak ditujukan untuk pengamanan terhadap pengalaman. Pengalaman harus dicek dengan menggunakan perhitungan defleksi yang sesuai, yang memasukkan juga tambahan defleksi akibat air yang tertampung tersebut, dan meninjau juga efek-efek jangka panjang akibat beban *sustained*, toleransi-toleransi konstruksi dan keandalan yang diijinkan untuk drainase.

^b Defleksi jangka panjang harus ditentukan, tetapi defleksi yang dihitung ini dapat dikurangi dengan defleksi yang terjadi sebelum pemasangan elemen-elemen nonstruktural. Reduksi ini besarnya bergantung pada data-data teknik yang dapat diterima mengenai karakteristik hubungan defleksi waktu pada elemen struktur tersebut.

^c Batas perbandingan ini dapat lebih kecil dari pada tercantum apabila ada pengukuran yang baik dalam mencegah kerusakan elemen yang terpasang tersebut, tetapi tidak boleh lebih kecil daripada toleransi elemen-elemen struktur tersebut.

