

Kehilangan Prategang

5.1 SIFAT KEHILANGAN PRATEGANG

Prategang efektif pada beton mengalami pengurangan secara berangsur-angsur sejak dari tahap transfer akibat berbagai sebab. Secara umum ini dinyatakan sebagai "kehilangan prategang". Suatu perkiraan yang cukup baik atas besarnya kehilangan prategang diperlukan dari sudut pandang desain. Berbagai jenis kehilangan yang dijumpai dalam sistem pratarik dan pascatarik dikumpulkan dalam Tabel 5.1.

TABEL 5.1 Jenis-jenis Kehilangan Prategang

No.	Pratarik	No.	Pascatarik
1.	Deformasi elastis beton	1.	Tidak ada kehilangan akibat deformasi elastis kalau semua kawat ditarik secara bersamaan. Kalau kawat-kawat ditarik secara berurutan, akan terdapat kehilangan prategang akibat deformasi elastis beton
2.	Relaksasi tegangan pada baja	2.	Relaksasi tegangan pada baja
3.	Penyusutan beton	3.	Penyusutan beton
4.	Rangkak beton	4.	Rangkak beton
		5.	Gesekan
		6.	Tergelincirnya ankur

Sebagai tambahan terhadap yang tersebut di atas, mungkin terdapat kehilangan prategang akibat perubahan temperatur secara mendadak, terutama dalam perawatan dengan uap (steam curing) terhadap unit-unit pratarik. Kenaikan temperatur menyebabkan suatu standar prategang sebagian (disebabkan oleh perpanjangan tendon antara unit-unit yang berdekatan di dalam proses rangkaian panjang) yang dapat menyebabkan terjadinya rang-

kak yang besar kalau beton tidak dirawat dengan cukup baik. Kalau terdapat kemungkinan perubahan temperatur antara waktu penarikan dan transfer, maka kehilangan tegangan yang bersesuaian harus diperhitungkan dalam desain.

5.2 KEHILANGAN AKIBAT DEFORMASI ELASTIS BETON

Kehilangan prategang akibat deformasi elastis beton tergantung pada rasio modulus serta tegangan rata-rata pada beton pada ketinggian baja.

Kalau

$$F_c = \text{prategang pada beton pada ketinggian baja}$$

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja}$$

$$E_c = \text{modulus elastisitas beton}$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \text{rasio modulus}$$

Regangan pada beton pada ketinggian baja = (f_c/E_c)

Tegangan pada baja yang bersesuaian dengan regangan ini = $(f_c/E_c)E_s$

Jadi kehilangan tegangan pada baja = $\alpha_e f_c$

Kalau tegangan awal pada baja diketahui, persentase kehilangan tegangan pada baja akibat deformasi elastis beton dapat dihitung.

CONTOH 5.1

Sebuah balok beton pratarik, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh kawat-kawat lurus yang membawa suatu gaya awal sebesar 150 kN dengan eksentrisitas 50 mm. Modulus elastisitas baja dan beton berturut-turut adalah 210 dan 35 kN/mm². Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada baja akibat deformasi elastis beton kalau luas kawat-kawat baja sama dengan 188 mm².

$$P = 150 \text{ kN}$$

$$e = d/6 = 300/6 = 50 \text{ mm}$$

$$A = (100 \times 300) = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_e = (E_s/E_c) = 6$$

$$\text{Tegangan awal pada baja} = \left(\frac{150 \times 10^3}{188} \right) = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan pada beton, } f_c = \left(\frac{150 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) + \left(\frac{150 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right)$$

$$= 6,66 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton} = \alpha_e f_c$$

$$= (6 \times 6,66) = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase kehilangan tegangan pada baja} = \left(\frac{40 \times 100}{800} \right) = 5\%$$

CONTOH 5.2

Sebuah balok beton persegi panjang, tinggi 300 mm dan lebar 200 mm, diberi prategang oleh lima-belas kawat berdiameter 5 mm yang terletak 65 mm dari tepi bawah balok dan tiga kawat berdiameter 5 mm yang terletak 25 mm dari tepi atas balok. Kalau kawat-kawat tersebut diberi tegangan awal sampai 840 N/mm², hitunglah persentase kehilangan tegang-

an pada baja segera setelah transfer dengan hanya memberikan kesempatan untuk kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton saja.

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_c = 31,5 \text{ kN/mm}^2$$

Kedudukan titik berat kawat-kawat terhadap sofit balok,

$$y = \left[\frac{(15 \times 65) + (3 \times 275)}{(15 + 3)} \right] = 100 \text{ mm}$$

Jadi eksentrisitas $e = (150 - 100) = 50 \text{ mm}$

Luas beton $A = (200 \times 300) = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2$

Momen inersia $I = \frac{(200 \times 300^3)}{12} = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$

Gaya prategang $P = (840)(18 \times 19,7) = 3 \times 10^5 \text{ N} = 300 \text{ kN}$

Tegangan-tegangan pada beton:

$$\text{Pada ketinggian kawat-kawat atas} = \left(\frac{300 \times 10^3}{6 \times 10^4} \right) - \left(\frac{300 \times 10^3 \times 50 \times 125}{45 \times 10^7} \right)$$

$$= 0,83 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pada ketinggian kawat-kawat bawah} = \left(\frac{300 \times 10^3}{6 \times 10^4} \right) + \left(\frac{300 \times 10^3 \times 50 \times 85}{45 \times 10^7} \right)$$

$$= 7,85 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Rasio modulus } (\alpha_e) = \left(\frac{210}{31,5} \right) = 6,68$$

Kehilangan tegangan pada kawat-kawat atas $= (6,88 \times 0,83) = 5,55 \text{ N/mm}^2$

Kehilangan tegangan pada kawat-kawat bawah $= (6,68 \times 7,85) = 52,5 \text{ N/mm}^2$

Persentase kehilangan tegangan :

$$\text{Untuk kawat-kawat atas} = \frac{5,55}{840} \times 100 = 0,66\%$$

$$\text{Untuk kawat-kawat bawah} = \frac{52,5}{840} \times 100 = 6,25\%$$

CONTOH 5.3

Sebuah balok beton pascatarik, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh tiga kabel, masing-masing mempunyai potongan melintang 50 mm^2 dan dengan tegangan awal sebesar 1200 N/mm^2 . Ketiga kabel tersebut semuanya lurus dan terletak 100 mm dari sofit balok. Kalau rasio modulus sama dengan 6, hitunglah kehilangan tegangan pada ketiga kabel tersebut akibat deformasi elastis beton hanya untuk kasus-kasus berikut:

- penarikan serta pengankuran yang bersamaan atas seluruh ketiga kabel dan
- penarikan secara berturut-turut atas ketiga kabel tersebut, setiap kali satu kabel.

Gaya pada masing-masing kabel, $P = 50 \times 1200 = 60 \times 10^3 \text{ N} = 60 \text{ kN}$

$$A = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$e = 50 \text{ mm} \quad y = 50 \text{ mm}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja,

$$f_c = \left(\frac{60 \times 10^3}{4 \times 10^4} \right) + \left(\frac{60 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) = 2,7 \text{ N/mm}^2$$

Kasus (a)

Di bawah penarikan serta pengankuran ketiga kabel secara bersamaan, tidak akan terdapat kehilangan akibat deformasi elastis beton.

Kasus (b)

Kalau kabel-kabel ditarik secara berurutan:

Kabel 1 ditarik dan diangkur—tak ada kehilangan akibat deformasi elastis.

Kabel 2 ditarik dan diangkur—kehilangan tegangan pada kabel 1 ditentukan oleh,

Kehilangan tegangan pada kabel 1 $= \alpha_e f_c = (6 \times 2,7) = 16,2 \text{ N/mm}^2$

Kabel 3 ditarik dan diangkur—kehilangan tegangan pada kabel 1 dan 2 ditentukan oleh,

Kehilangan tegangan pada kabel 1 $= (6 \times 2,7) = 16,2 \text{ N/mm}^2$ (pada saat kabel 3 ditarik)

Kehilangan tegangan pada kabel 2 $= (6 \times 2,7) = 16,2 \text{ N/mm}^2$ (pada saat kabel 3 ditarik)

Jadi, kehilangan tegangan total akibat deformasi elastis beton pada

Kabel 1 $= (16,2 + 16,2) = 32,4 \text{ N/mm}^2$

Kabel 2 $= 16,2 = 16,2 \text{ N/mm}^2$

Kabel 3 $= 0$

Kehilangan tegangan rata-rata dengan meninjau semua kabel $= 16,2 \text{ N/mm}^2$

Dapat ditunjukkan bahwa kalau jumlah kawat, batang, atau strand adalah besar, kehilangan akibat perpendekan elastis mendekati (tetapi tidak melebihi) setengah dari kehilangan yang sesuai dengan pada pratarik, yaitu kehilangan tegangan

$$= \left(\frac{1}{2} \alpha_e f_c \right)$$

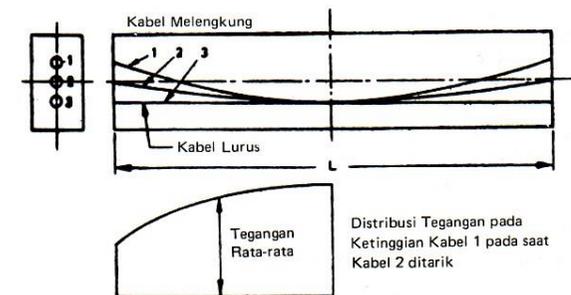
di mana f_c = tegangan pada beton pada ketinggian baja akibat pengaruh semua kabel yang ditarik secara bersamaan.

Dengan menerapkan prinsip ini terhadap soal di atas, maka

$$\text{Kehilangan tegangan} = \left[\frac{1}{2} \times 6 \times (3 \times 2,7) \right] = 24,3 \text{ N/mm}^2$$

5.2.1 Kehilangan Tegangan akibat Penarikan Kabel-kabel yang Melengkung secara Berurutan

Di dalam hampir semua gelagar jembatan, kabel-kabel dibuat melengkung dengan eksentrisitas maksimum pada tengah-tengah bentang. Dalam hal demikian, kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton diperhitungkan dengan memperhitungkan tegangan rata-rata pada beton pada ketinggian baja. Tinjaulah sebuah balok yang ditunjukkan dalam Gambar 5.1, yang diberi pratarik oleh 3 kabel parabolis. Distribusi tegangan pada beton pada ketinggian kabel 1 juga ditunjukkan dalam gambar tersebut pada saat kabel 2 ditarik. Untuk perhitungan kehilangan tegangan, maka tegangan rata-rata (diperlihatkan dalam gambar)



Gambar 5.1 Penarikan Kabel-kabel Melengkung secara Berurutan.

ditinjau. Pada saat kabel 3 ditarik, akan terdapat kehilangan tegangan pada kabel 1 dan 2. Hal ini dilukiskan dalam contoh berikut.

CONTOH 5.4

Sebuah balok beton pratarik, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, dengan bentangan 10 m diberi tegangan oleh tiga kabel 1, 2 dan 3 yang ditarik dan diangkur secara berurutan. Luas potongan melintang masing-masing kabel sama dengan 200 mm² dan tegangan awal pada kabel adalah 1200 N/mm², $\alpha_e = 6$. Kabel pertama adalah parabolis dengan eksentrisitas 50 mm di bawah sumbu garis berat pada tengah-tengah bentang dan 50 mm di atas sumbu garis berat pada penampang di atas tumpuan. Kabel kedua adalah parabolis dengan eksentrisitas nol pada tumpuan dan eksentrisitas 50 mm di tengah-tengah bentang. Kabel ketiga adalah lurus dengan eksentrisitas yang merata sebesar 50 mm di bawah sumbu garis berat. Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada masing-masing kabel, kalau kabel-kabel tersebut ditarik serta diangkur secara berurutan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya pada masing-masing kabel, } P &= 240 \text{ kN} \\ A &= 3 \times 10^4 \text{ mm}^2 \\ I &= 225 \times 10^6 \text{ mm}^4 \\ \alpha_e &= 6 \end{aligned}$$

Pada saat kabel 1 ditarik dan diangkur—tidak ada kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton. Pada saat kabel 2 ditarik dan diangkur, tegangan pada ketinggian kabel 1 ditentukan oleh,

$$\text{Tegangan pada penampang di atas tumpuan} = \left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) = 8 \text{ N/mm}^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan di tengah-tengah bentang} &= \left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) + \left(\frac{(240 \times 10^3) \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) \\ &= 10,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, tegangan rata-rata pada beton} &= 8 + (2/3) \times 2,7 = 9,8 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Kehilangan tegangan pada kabel} &= (6 \times 9,8) = 58,8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Pada saat kabel 3 ditarik dan diangkur, distribusi tegangan pada ketinggian kabel 1 dan kabel 2 dan tegangan rata-rata serta kehilangan tegangan diperoleh seperti diberikan di bawah.

	Kabel 1	Kabel 2
Tegangan di tumpuan	$\left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) - \left(\frac{240 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) = 5,3 \text{ N/mm}^2$	$\left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) = 8 \text{ N/mm}^2$
Tegangan di tengah-tengah bentang	$\left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) + \left(\frac{240 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) = 10,7 \text{ N/mm}^2$	$\left(\frac{240 \times 10^3}{3 \times 10^4} \right) + \left(\frac{240 \times 10^3 \times 50 \times 50}{225 \times 10^6} \right) = 10,7 \text{ N/mm}^2$
Tegangan rata-rata dalam beton	$[5,3 + (2/3) \times 5,4] = 8,9 \text{ N/mm}^2$	$[8 + (2/3) \times 2,7] = 9,8 \text{ N/mm}^2$

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan tegangan pada kabel} &= (6 \times 8,9) = 53,4 \text{ N/mm}^2 & (6 \times 9,8) = 58,8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Kehilangan total	Persentase kehilangan tegangan
Kabel 1, $(58,8 + 53,4) = 112,2 \text{ N/mm}^2$	9,4%
Kabel 2, 58,8 N/mm ²	4,9%
Kabel 3, tak ada kehilangan tegangan	0%

CONTOH 5.5

Sebuah balok beton di atas tumpuan sederhana dengan penampang seragam diberi pascatarik oleh dua kabel, keduanya mempunyai eksentrisitas 100 mm di bawah titik berat penampang di tengah bentang. Kabel pertama parabolis dan diangkur pada eksentrisitas 100 mm di atas titik berat penampang pada masing-masing ujungnya. Kabel kedua lurus dan sejajar dengan garis yang menghubungkan tumpuan-tumpuannya. Kalau luas potongan melintang masing-masing kabel sama dengan 100 mm², dan balok beton tersebut mempunyai luas penampang $2 \times 10^4 \text{ mm}^2$ dan jari-jari girasi 120 mm, hitunglah kehilangan tegangan pada kabel pertama pada saat kabel kedua ditarik sampai mencapai tegangan 1200 N/mm². Ambil rasio modulus sama dengan 6 dan gesekan diabaikan.

$$\text{Luas penampang beton, } A = 2 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jari-jari girasi } i = 120 \text{ mm}$$

$$\text{Momen inersia, } I = (2 \times 10^4 \times 120^2) = 288 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Gaya prategang } P = (1200 \times 100) = 12 \times 10^4 \text{ N}$$

Pada saat kabel 2 ditarik dan diangkur, tegangan pada ketinggian kabel 1 ditentukan oleh,

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada beton} &= \left(\frac{12 \times 10^4}{2 \times 10^4} \right) \pm \left(\frac{12 \times 10^4 \times 100 \times 100}{288 \times 10^6} \right) = (6 \pm 4,2) \\ &= 10,2 \text{ N/mm}^2 \text{ pada penampang tengah} \\ &= 1,8 \text{ N/mm}^2 \text{ pada penampang ujung} \end{aligned}$$

$$\text{Tegangan rata-rata pada beton} = [1,8 + (2/3) \times 8,4] = 7,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Kehilangan tegangan pada kabel 1} = (6 \times 7,4) = 44,4 \text{ N/mm}^2$$

5.3 KEHILANGAN AKIBAT PENYUSUTAN BETON

Susut beton pada batang prategang mengakibatkan perpendekan kawat-kawat yang ditarik dan dengan demikian ikut menyebabkan kehilangan tegangan. Susut beton dipengaruhi oleh tipe semen dan agregat serta metode perawatan yang dipakai. Pemakaian beton berkekuatan tinggi dengan rasio air/semen rendah menghasilkan berkurangnya susut beton dan dengan demikian juga kehilangan prategangnya. Penyebab utama dari susut pengeringan adalah hilangnya air yang berlanjut pada beton. Susut pada permukaan batang adalah lebih tinggi. Perbedaan susut antara bagian dalam dan permukaan batang yang besar dapat mengakibatkan "gradien regangan" (strain gradient) yang mengarah kepada retak permukaan. Oleh karena itu, perawatan beton yang tepat sangat penting untuk mencegah terjadinya retak akibat susut pada batang prategang.

Dalam hal batang pratarik, umumnya perawatan dengan pembasahan dilakukan untuk membatasi susut sampai pada saat transfer. Akibatnya, jumlah regangan susut sisa setelah transfer prategang pada batang pratarik akan lebih besar dibandingkan dengan pada batang pascatarik, di mana suatu bagian susut akan telah terjadi pada waktu transfer tegangan.

Segi ini telah dipertimbangkan dalam rekomendasi yang dibuat oleh peraturan standar India (IS: 1343) untuk kehilangan prategang akibat susut beton dan dirinci di bawah ini.

ϵ_{cs} = jumlah regangan susut sisa yang mempunyai nilai sebesar 300×10^{-6} untuk

pratarik dan $\left[\frac{200 \times 10^{-6}}{\log_{10}(t+2)} \right]$ untuk pascatarik.

di mana, t = umur beton pada saat transfer dalam hari.

Nilai ini dapat ditingkatkan dengan 50 persen dalam kondisi udara kering, sampai suatu nilai maksimum sebesar 300×10^{-6} satuan.

Kehilangan tegangan pada baja akibat susut beton diperhitungkan sebagai,

Kehilangan tegangan = $\epsilon_{cs} \times E_s$

di mana E_s = modulus elastisitas baja.

Rekomendasi peraturan Inggris untuk susut mencakup kelembaban lingkungan sebagai suatu faktor. Regangan susut sisa yang disarankan adalah 300×10^{-6} untuk kondisi normal dan 100×10^{-6} untuk kondisi lembab pada pratarik dan 200×10^{-6} untuk kondisi normal serta 70×10^{-6} untuk kondisi lembab pada pascatarik. Suatu kelembaban relatif sebesar 70 persen dianggap normal, sedangkan suatu kelembaban relatif sebesar 90 persen dianggap lembab.

CONTOH 5.6

Sebuah balok beton diberi prategang dengan suatu kabel yang membawa gaya prategang awal 300 kN. Luas potongan melintang kawat-kawat pada kabel adalah 300 mm^2 . Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada kabel tersebut hanya akibat susut beton dengan menggunakan rekomendasi IS: 1343 dengan anggapan bahwa balok tersebut adalah: (a) pratarik dan (b) pascatarik. Dimisalkan $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ dan umur beton pada saat transfer = 8 hari.

$$\text{Tegangan awal pada kawat} = \left(\frac{300 \times 10^3}{300} \right) = 1000 \text{ N/mm}^2$$

(a) Kalau balok tersebut pratarik, regangan susut sisa total = 300×10^{-6} satuan.

$$\text{Jadi, kehilangan tegangan} = (300 \times 10^{-6}) (210 \times 10^3) = 63 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Jadi, persentase kehilangan tegangan} = \left(\frac{63}{1000} \times 100 \right) = 6,3\%$$

(b) Kalau balok tersebut pascatarik, regangan susut sisa total

$$= \left[\frac{200 \times 10^{-6}}{\log_{10}(8+2)} \right] = 200 \times 10^{-6} \text{ satuan}$$

$$\text{Jadi, kehilangan tegangan} = (200 \times 10^{-6}) (210 \times 10^3) = 42 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase kehilangan tegangan} = \left(\frac{42}{1000} \times 100 \right) = 4,2\%$$

5.4 KEHILANGAN AKIBAT RANGKAK BETON

Prategang yang terus-menerus pada beton suatu batang prategang mengakibatkan rangkakan pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Faktor-faktor yang mempengaruhi rangkakan telah dibahas dalam Bagian 2.1.5. Kehilangan tegangan pada baja akibat rangkakan beton dapat diperhitungkan kalau besarnya regangan rangkakan ultimit atau koefisien rangkakan diketahui.

1. Metode Regangan Rangkakan Ultimit

Kalau ϵ_{cc} = regangan rangkakan ultimit untuk suatu tegangan satuan yang terus-menerus

f_c = tegangan tekan pada beton pada ketinggian baja

E_s = modulus elastisitas baja

Maka kehilangan tegangan pada baja akibat rangkakan beton = $\epsilon_{cc} f_c E_s$.

2. Metode Koefisien Rangkakan

Kalau ϕ = koefisien rangkakan

ϵ_c = regangan rangkakan

ϵ_s = regangan elastis

α_e = rasio modulus

f_c = tegangan pada beton

E_c = modulus elastisitas beton

E_s = modulus elastisitas baja

$$\text{Koefisien rangkakan} = \frac{\text{regangan rangkakan}}{\text{regangan elastis}}. \text{ Jadi } \phi = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_e}$$

Jadi, $\epsilon_c = \phi \epsilon_e = \phi (f_c / E_c)$

$$\begin{aligned} \text{Maka, kehilangan tegangan pada baja} &= \epsilon_c E_s = \phi (f_c / E_c) E_s \\ &= \phi f_c \alpha_e \end{aligned}$$

Besarnya koefisien rangkakan, ϕ , berubah-ubah tergantung pada kelembaban, kualitas beton, lamanya pembebanan dan umur beton pada saat dibebani. Nilai-nilai yang umum yang direkomendasikan untuk koefisien rangkakan bervariasi dari 1,5 pada situasi berair sampai 4,0 untuk kondisi kering dengan kelembaban relatif 35 persen.

Peraturan Inggris untuk beton struktural menyarankan nilai rencana regangan rangkakan ultimit sebesar 48×10^{-6} untuk pratarik dan 36×10^{-6} untuk pascatarik. Nilai-nilai ini perlu dinaikkan dalam perbandingan terbalik kalau kekuatan tekan beton pada saat transfer kurang dari 40 N/mm^2 .

CONTOH 5.7

Sebuah balok beton dengan penampang persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 5 kawat dengan diameter 7 mm yang terletak pada eksentrisitas 50 mm, tegangan awal pada kawat sama dengan 1200 N/mm^2 . Hitunglah kehilangan tegangan pada baja akibat rangkakan beton dengan memakai metode regangan rangkakan ultimit menjadi koefisien rangkakan (IS: 1343-1980). Pakailah data-data berikut:

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_c = 35 \text{ kN/mm}^2$$

$$\text{Regangan rangkakan ultimit}$$

$$A = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$\epsilon_{cc} = 41 \times 10^{-6} \text{ mm/mm per N/mm}^2$$

$$P = (5 \times 38,5 \times 1200) = 23 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\alpha_e = (E_s / E_c) = 6$$

$$\text{Koefisien rangkakan } (\phi) = 1,6$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja adalah

$$f_c = \frac{23 \times 10^4}{3 \times 10^4} + \left[\frac{(23 \times 10^4 \times 50) 50}{225 \times 10^6} \right] = 10,2 \text{ N/mm}^2$$

1. Metode Regangan Rangkak Ultimit

Kalau ϵ_{cc} = regangan rangkak ultimit untuk suatu tegangan satuan yang terus-menerus

$$f_c = \text{tegangan tekan pada beton pada ketinggian baja}$$

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja}$$

Maka kehilangan tegangan pada baja akibat rangkak beton = $\epsilon_{cc} f_c E_s$.

2. Metode Koefisien Rangkak

Kalau ϕ = koefisien rangkak
 ϵ_c = regangan rangkak
 ϵ_s = regangan elastis
 α_e = rasio modulus
 f_c = tegangan pada beton
 E_c = modulus elastisitas beton
 E_s = modulus elastisitas baja

$$\text{Koefisien rangkak} = \frac{\text{regangan rangkak}}{\text{regangan elastis}}. \text{ Jadi } \phi = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_e}$$

Jadi, $\epsilon_c = \phi \epsilon_e = \phi (f_c / E_c)$

Maka, kehilangan tegangan pada baja = $\epsilon_c E_s = \phi (f_c / E_c) E_s$
 $= \phi f_c \alpha_e$

Besarnya koefisien rangkak, ϕ , berubah-ubah tergantung pada kelembaban, kualitas beton, lamanya pembebanan dan umur beton pada saat dibebani. Nilai-nilai yang umum yang direkomendasikan untuk koefisien rangkak bervariasi dari 1,5 pada situasi berair sampai 4,0 untuk kondisi kering dengan kelembaban relatif 35 persen.

Peraturan Inggris untuk beton struktural menyarankan nilai rencana regangan rangkak ultimit sebesar 48×10^{-6} untuk pratarik dan 36×10^{-6} untuk pascatarik. Nilai-nilai ini perlu dinaikkan dalam perbandingan terbalik kalau kekuatan tekan beton pada saat transfer kurang dari 40 N/mm^2 .

CONTOH 5.7

Sebuah balok beton dengan penampang persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 5 kawat dengan diameter 7 mm yang terletak pada eksentrisitas 50 mm, tegangan awal pada kawat sama dengan 1200 N/mm^2 . Hitunglah kehilangan tegangan pada baja akibat rangkak beton dengan memakai metode regangan rangkak ultimit menjadi koefisien rangkak (IS: 1343-1980). Pakailah data-data berikut:

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2 \quad I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$E_c = 35 \text{ kN/mm}^2 \quad \text{Regangan rangkak ultimit}$$

$$A = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad \epsilon_{cc} = 41 \times 10^{-6} \text{ mm/mm per N/mm}^2$$

$$P = (5 \times 38,5 \times 1200) = 23 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\alpha_e = (E_s / E_c) = 6$$

$$\text{Koefisien rangkak } (\phi) = 1,6$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja adalah

$$f_c = \frac{23 \times 10^4}{3 \times 10^4} + \left[\frac{(23 \times 10^4 \times 50)}{225 \times 10^6} \right] = 10,2 \text{ N/mm}^2$$

1. Metode Regangan Rangkak Ultimit

$$\text{Kehilangan tegangan pada baja} = \epsilon_{cc} f_c E_s = (41 \times 10^{-6}) (10,2) (210 \times 10^3)$$

$$= 88 \text{ N/mm}^2$$

2. Metode Koefisien Rangkak

$$\text{Kehilangan tegangan pada baja} = (\phi \cdot f_c \cdot \alpha_e) = (1,6 \times 10,2 \times 6) = 97,92 \text{ N/mm}^2$$

CONTOH 5.8

Sebuah balok beton pascatarik dengan penampang persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, ditegangkan oleh kabel parabolis dengan eksentrisitas nol pada tumpuan-tumpuannya dan eksentrisitas 50 mm di tengah-tengah bentang. Luas penampang kabel adalah 200 mm^2 dan tegangan awal pada kabel adalah 1200 N/mm^2 . Kalau regangan rangkak ultimit sama dengan $30 \times 10^{-6} \text{ mm/mm per N/mm}^2$ tegangan dan modulus elastisitas baja sama dengan 210 kN/mm^2 , hitunglah kehilangan tegangan pada baja hanya akibat rangkak beton saja.

$$A = 3 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad P = (200 \times 1200) = 240.000 \text{ N}$$

$$I = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4 \quad e = 50 \text{ mm}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja :

$$\text{Pada penampang di atas tumpuan} = \left(\frac{240.000}{30.000} \right) = 8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pada penampang di tengah-tengah bentang} = \left[\frac{240.000}{30.000} + \frac{(24 \times 10^4 \times 50) 50}{225 \times 10^6} \right]$$

$$= 10,7 \text{ N/mm}^2$$

Jadi, tegangan rata-rata pada ketinggian baja (f_c)

$$= [8 + (2/3) \times 2,7] = 9,8 \text{ N/mm}^2$$

Jadi, kehilangan tegangan pada kabel akibat rangkak beton

$$= \epsilon_{cc} f_c E_s = (30 \times 10^{-6}) (9,8) (210 \times 10^3)$$

$$= 62 \text{ N/mm}^2$$

5.5 KEHILANGAN AKIBAT RELAKSASI TEGANGAN PADA BAJA

Berbagai faktor yang mempengaruhi gejala rangkak pada baja telah dibahas dalam Bagian 2.2.4. Hampir semua peraturan menetapkan kehilangan tegangan akibat relaksasi baja sebagai persentase dari tegangan awal pada baja. Peraturan standar India menyarankan suatu nilai yang bervariasi dari 0 sampai 90 N/mm^2 untuk tegangan pada kawat yang bervariasi dari $0,5 f_{pu}$ sampai $0,8 f_{pu}$. Kehilangan prategang akibat relaksasi baja yang disarankan dalam peraturan Inggris dan rancangan peraturan India dirangkum dalam Tabel 5.2. Pemberian tegangan berlebihan sementara antara 5-10 persen untuk suatu periode 2 menit kadang-kadang dipakai untuk mengurangi kehilangan ini seperti dalam kasus kawat yang ditarik.

Namun, pemberian tegangan berlebihan tampaknya tidak memberikan keuntungan untuk kawat-kawat yang distabilkan, yang mempunyai kelebihan 0,1 persen tegangan uji dari 85 persen kekuatan tariknya sebagai hasil dari cara pemanasan, oleh karena kawat-kawat demikian sangat sedikit mengalami deformasi permanen apabila diberi tegangan berlebihan.

TABEL 5.2 Kehilangan Prategang akibat Relaksasi Baja

(a) Rekomendasi Peraturan

Tipe tendon	Batas kekuatan karakteristik, N/mm^2	Modulus elastisitas, kN/mm^2	Persentase kehilangan prategang untuk	
			f_{pi} 0,7	f_{pu} 0,8
Kawat baja ditarik dingin, BS-2691				
1. Diluruskan lebih dulu (relaksasi normal)	1570-1720	200	5	8,5
2. Diluruskan lebih dulu (relaksasi rendah)	1570-1720	200	2	3,0
Strand tujuh kawat, BS-3617				
1. relaksasi normal	1640-1820	200	7	12
2. relaksasi rendah	1649-1820	200	2	3
Strand sembilan belas kawat, BS-4757				
1. seperti keadaan dipintal	1480-1540	175	9	14
2. relaksasi normal	1760	175	7	12
3. relaksasi rendah	1760	175	2,5	3,5
Batang baja campuran bermutu tinggi dikerjakan secara dingin, BS-4486				
	995-1030	175	4	—

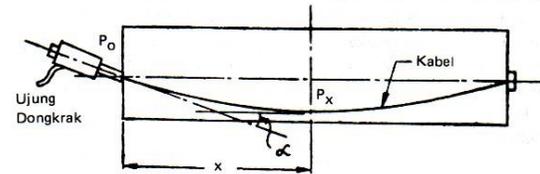
(b) Rekomendasi Peraturan Standar India (IS 1343). Kehilangan karena relaksasi untuk baja prategang, pada 1000 jam pada 27°C.

Tegangan awal	Kehilangan akibat relaksasi, N/mm^2
$0,5f_{pu}$	0
$0,6f_{pu}$	35
$0,7f_{pu}$	70
$0,8f_{pu}$	90

5.6 KEHILANGAN TEGANGAN AKIBAT GESEKAN

Pada kasus batang pascatarik, apabila kabel-kabel lurus atau agak melengkung ditarik, maka gesekan terhadap dinding saluran atau kisi-kisi penyekat akan mengakibatkan kehilangan tegangan yang makin bertambah menurut jaraknya dari dongkrak. Selain itu, akan terdapat kehilangan tegangan akibat gesekan antara kabel dan gerak menggelombang dalam

saluran yang disebut sebagai "goyangan" atau "gelombang" yang merupakan penyimpangan kecil saluran dari kedudukan yang ditetapkan.



Gambar 5.2 Kehilangan Tegangan akibat Gesekan.

Dengan melihat Gambar 5.2, besarnya gaya prategang, P_x , pada suatu jarak x dari ujung penarikan mengikuti suatu fungsi eksponensial tipe,

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + Kx)}$$

di mana,

- P_0 = gaya prategang pada ujung dongkrak
- μ = koefisien gesekan antara kabel dan saluran
- α = sudut kumulatif dalam radian melalui mana garis-garis singgung terhadap profil kabel telah berputar antara dua titik sembarang yang ditinjau
- K = koefisien gesekan untuk pengaruh "gelombang"
- $e = 2,7183$

Peraturan standar India menyarankan nilai-nilai berikut untuk μ dan K :

Nilai-nilai untuk koefisien gesekan μ

- 0,55 untuk baja yang bergerak pada beton yang licin
 - 0,35 untuk baja yang bergerak pada baja yang dijepit di saluran
 - 0,25 untuk baja yang bergerak pada baja yang dijepit di beton
 - 0,25 untuk baja yang bergerak pada timah
 - 0,18-0,30 untuk kabel tali kawat berlapis-banyak di dalam selongsong baja persegi panjang yang tegar
 - 0,15-0,25 untuk kabel tali kawat berlapis-banyak dengan pelat-pelat pengatur jarak ke arah lateral
- Saran-saran ini didasarkan atas pekerjaan eksperimental yang dilakukan oleh Guyon³ dan Cooley⁴.

Nilai-nilai untuk koefisien gesekan untuk pengaruh gelombang K

- 0,15 per 100 m untuk kondisi normal
 - 1,5 per 100 m untuk saluran ber dinding-tipis dan di mana dijumpai getaran-getaran hebat dalam kondisi-kondisi yang merugikan lainnya.
- Koefisien tersebut dapat dikurangi sampai nol bila ruang antara saluran dan kabel cukup besar untuk menghilangkan pengaruh "gelombang". Selongsong dibuat dari pipa baja berukuran berat dengan sambungan yang rapat air, di mana deformasi profil saluran dicegah selama penggetaran beton.

Koefisien gesekan dapat sangat dikurangi dengan memakai suatu macam pelumas, khususnya lemak pelumas (grease), minyak, campuran minyak dan grafit, serta prafin.

Penyelidikan-penyelidikan oleh Leonhardt⁵, Foppl⁶, dan Morsch⁷ menunjukkan bahwa pemakaian parafin sejauh ini memberikan koefisien gesekan yang paling rendah, khususnya dengan tekanan kontak yang tinggi. Juga telah diamati bahwa lapisan parafin tetap efektif meskipun menerima gerakan berulang-ulang pada tekanan kontak sebesar 60 N/mm². Pada tekanan ini, besarnya koefisien gesekan berkurang sampai suatu nilai serendah 0,004. Pada tekanan antara 20 dan 5 N/mm², koefisien gesekan berkisar antara 0,03 sampai 0,02. Selain itu, parafin didapati tidak merugikan terhadap beton dan adukan semen. Suatu pelumas lain—Teflon, yang diproduksi oleh Dupon, ternyata mampu memberikan hasil yang lebih menguntungkan.

Nilai-nilai eksperimental koefisien gesekan telah dilaporkan oleh Morice dan Cooley⁸ untuk bermacam-macam tipe saluran dan sistem pascatarik.

CONTOH 5.9

Sebuah balok beton dengan bentangan 10 m, lebar 100 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 3 kabel. Luas penampang masing-masing kabel sama dengan 200 mm² dan tegangan awal pada kabel sama dengan 1200 N/mm². Kabel 1 parabolis dengan eksentrisitas 50 mm di atas titik berat pada tumpuan-tumpuan dan 50 mm di bawah titik berat pada tengah-tengah bentang. Kabel 2 juga parabolis dengan eksentrisitas nol pada tumpuan-tumpuan dan 50 mm di bawah titik berat pada tengah-tengah bentang. Kabel 3 lurus dengan eksentrisitas seragam 50 mm di bawah titik berat. Kalau kabel-kabel tersebut ditarik dari satu ujung saja, hitunglah persentase kehilangan tegangan pada masing-masing kabel akibat pengaruh gesekan. Misalkan $\mu = 0,35$ dan $K = 0,0015$ per m. Persamaan parabola ditentukan oleh:

$$y = (4e/L^2) x (L - x)$$

Kemiringan pada ujung-ujung (pada $x = 0$) $= dy/dx = (4e/L^2)(L - 2x) = (4e/L)$

Untuk kabel 1

$$\text{Kemiringan pada ujung} = \frac{4 \times 10}{10 \times 100} = 0,04$$

Jadi, sudut kumulatif antara garis-garis singgung, $\alpha = (2 \times 0,04) = 0,08$ radian

Untuk kabel 2

$$\text{Kemiringan pada ujung} = \frac{4 \times 5}{10 \times 100} = 0,02$$

Jadi, sudut kumulatif antara garis-garis singgung, $\alpha = (2 \times 0,02) = 0,04$ radian

Gaya prategang awal pada masing-masing kabel, $P_0 = 200 \times 1200 = 240.000$ N. Kalau $P_x =$ gaya prategang (tegangan) pada kabel pada ujung yang paling jauh,

$$P_x = P_0 e^{-(\mu\alpha + Kx)}$$

Untuk nilai-nilai $(\mu\alpha + Kx)$, kita dapat menulis

$$P_x = P_0 [1 - (\mu\alpha + Kx)]$$

Jadi: Kehilangan tegangan $= P_0 (0,35 \times 0,08 + 0,0015 \times 10) = 0,043 P_0$

kabel 1 $= P_0 (0,35 \times 0,04 + 0,0015 \times 10) = 0,029 P_0$

kabel 3 $= P_0 (0 + 0,0015 \times 10) = 0,015 P_0$

Kalau $P_0 =$ Tegangan awal $= 1200$ N/mm²

Kabel No.	Kehilangan Tegangan N/mm ²	Persentase kehilangan
1	51,6	4,3
2	34,8	2,9
3	18,0	1,5

CONTOH 5.10

Sebuah balok beton pascatarik, lebar 200 mm dan tinggi 450 mm, diberi prategang oleh suatu kabel melingkar (luas total $= 800$ mm²) dengan eksentrisitas nol pada ujung-ujungnya dan 150 mm di tengah-tengah bentang. Bentang balok tersebut adalah 10 m. Kabel ditegangkan dari satu ujung sedemikian rupa sehingga tersedia suatu tegangan awal sebesar 840 N/mm² pada kawat-kawat pada ujung yang tak didongkrak tepat setelah pengangkutan. Tentukan tegangan pada kawat-kawat pada ujung yang didongkrak dan persentase kehilangan tegangan akibat gesekan.

Koefisien gesekan untuk pengaruh "kelengkungan" $= 0,6$

Koefisien gesekan untuk pengaruh "gelombang" $= 0,003/m$.

Kalau $R =$ jari-jari kabel melingkar $(R - 0,15)^2 + 5^2 = R^2$ yang memberikan

$$R = 84 \text{ m}$$

Kalau $\alpha =$ sudut antara bidang horisontal dan garis singgung yang ditarik terhadap kabel pada tumpuan

$$\sin \alpha = (5/84) = 0,06 \text{ radian}$$

Jadi, sudut kumulatif antara garis-garis singgung terhadap kabel pada tumpuan

$$= (2 \times 0,06) = 0,12 \text{ radian.}$$

Ditentukan,

$P_x =$ tegangan pada ujung yang tak didongkrak $= 840$ N/mm²

$P_0 =$ tegangan awal pada ujung yang didongkrak

$$P_x = P_0 [1 - (0,6 \times 0,12 + 0,003 \times 10)] = 0,898 P_0$$

Jadi

$$P_0 = \left(\frac{P_x}{0,898} \right) = \left(\frac{840}{0,898} \right) = 940 \text{ N/mm}^2$$

Kehilangan tegangan pada kabel $= (940 - 840) = 100$ N/mm²

Persentase kehilangan tegangan $= \left(\frac{100}{940} \times 100 \right) = 10,6\%$

CONTOH 5.11

Sebuah tangki beton silindris, dengan diameter luar 40 m, akan diberi prategang secara melingkar dengan perantara kawat baja bermutu tinggi ($E_s = 210$ kN/mm²) yang didongkrak pada 4 titik, terpisah 90 derajat. Kalau tegangan minimum pada kawat segera setelah penarikan adalah 600 N/mm² dan koefisien gesekan adalah 0,5, hitunglah

- tegangan maksimum yang harus diberikan pada kawat-kawat pada dongkrak, dan
- perpanjangan yang diharapkan terjadi di tempat dongkrak.

Gaya prategang pada ujung paling jauh, P_x , dikaitkan dengan gaya pada ujung yang didongkrak, P_0 , dengan persamaan

$$P_x = P_0 e^{-\mu\alpha}$$

$$600 = P_0 e^{-(0,5 \times \pi/2)} \text{ di mana } e = 2,7183$$

$$P_0 = (600) (2,7183^{0,79}) = 1320 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan rata-rata pada kawat} = \left(\frac{1320 + 600}{2} \right) = 960 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Panjang kawat} = \left(\frac{\pi \times 40 \times 1000}{4} \right) = 10^4 \pi \text{ mm}$$

$$\text{Jadi, perpanjangan pada tempat dongkrak} = \left(\frac{960}{210 \times 10^3} \times 10^4 \pi \right) = 144 \text{ mm}$$

5.7 KEHILANGAN AKIBAT PENGGELINCIRAN ANGKUR

Di dalam hampir sama sistem pascatarik, apabila kabel ditarik dan dongkrak dilepaskan untuk mentransfer prategang beton, pasak-pasak gesekan yang dipasang untuk memegang kawat-kawat dapat menggelincir pada jarak yang pendek sebelum kawat-kawat tersebut menempatkan diri secara kokoh di antara pasak-pasak tadi. Besarnya penggelinciran tergantung pada tipe pasak dan tegangan pada kawat. Di dalam sistem di mana tendon dilingkarkan ke sekeliling blok angkur beton, seperti dalam sistem Leonhardt-Baur, kehilangan tegangan dapat terjadi karena kawat-kawat menusuk ke dalam angkur. Kalau digunakan pelat-pelat angkur, mungkin perlu untuk memperhitungkan penurunan kecil pelat tersebut ke dalam ujung batang beton.

Kehilangan selama pengangkutan, yang terjadi pada pegangan tipe pasak biasanya di lapangan diperhitungkan dengan memberikan perpanjangan berlebih pada tendon dalam operasi pemrategangan sebesar yang tertarik masuk sebelum pengangkutan. Namun, metode ini memuaskan asalkan tegangan berlebih sesaat tidak melebihi batas-batas yang ditetapkan sebesar 80-85 persen kekuatan tarik ultimit kawat.

Besarnya kehilangan tegangan akibat penggelinciran di angkur dihitung sebagai berikut:

Kalau Δ = penggelinciran angkur, mm
 L = panjang kabel, mm
 A = luas penampang melintang kabel, mm²
 E_s = modulus elastisitas baja, N/mm²
 P = gaya prategang pada kabel, N

maka,

$$\frac{PL}{AE_s} = \Delta$$

$$\text{Kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur} = (P/A) = E_s \Delta / L$$

Oleh karena kehilangan tegangan disebabkan oleh suatu jumlah perpindahan total tertentu, maka persentase kehilangannya lebih tinggi untuk batang pendek daripada untuk batang yang lebih panjang. Pada sistem pratarik rangkaian panjang, penggelinciran pada angkur biasanya sangat kecil dibandingkan dengan panjangnya kawat penarik dan dengan demikian pada umumnya diabaikan. Pada pelaksanaan prategang suatu batang pendek, perhatian sepenuhnya harus diberikan untuk memperhitungkan kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur yang merupakan bagian besar dari kehilangan total.

CONTOH 5.12

Sebuah balok beton diberi pascatarik dengan suatu kabel yang membawa tegangan awal sebesar 1000 N/mm². Penggelinciran pada ujung yang didongkrak ternyata sama dengan 5 mm. Modulus elastisitas baja adalah 210 kN/mm². Hitunglah persentase kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur kalau panjang balok sama dengan

(a) 30 m; dan (b) 3 m.

$$\text{Kehilangan tegangan akibat penggelinciran angkur} = E_s \Delta / L$$

(a) Untuk balok dengan panjang 30 m, kehilangan tegangan

$$= \frac{(210 \times 10^3) (5)}{30 \times 1000} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Jadi, persentase kehilangan tegangan} = \frac{35}{1000} \times 100 = 3,5\%$$

(b) Untuk balok dengan panjang 3 m, kehilangan tegangan

$$= \frac{(210 \times 10^3) (5)}{3 \times 1000} = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Jadi, persentase kehilangan tegangan} = \frac{350}{1000} \times 100 = 35\%$$

CONTOH 5.13

Suatu kabel yang memberikan pascatarik pada balok sepanjang 10 m pada awalnya ditarik sampai mencapai tegangan 1000 N/mm² pada satu ujung. Kalau tendon melengkung sedemikian rupa sehingga kemiringannya pada masing-masing ujung sama dengan 1 banding 24 pada masing-masing ujung, dengan luas penampang 600 mm², hitunglah kehilangan prategang akibat gesekan yang ditentukan dengan data-data berikut.

Koefisien gesekan antara saluran dan kabel = 0,55; koefisien gesekan untuk pengaruhan "gelombang" = 0,0015 per m. Selama pengangkutan, kalau terdapat penggelinciran sebesar 3 mm pada ujung yang didongkrak, hitunglah gaya akhir pada kabel dan persentase kehilangan tegangan akibat gesekan dan penggelinciran. $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$.

$$\text{Perubahan kemiringan total dari ujung ke ujung, } \alpha = (2 \times 1/24) = (1/12)$$

$$\mu\alpha = (0,55 \times 1/12) = 0,046$$

$$Kx = (0,0015 \times 10) = 0,015$$

Kalau P_0 = prategang pada ujung yang ditarik atau ujung yang didongkrak, kehilangan tegangan akibat gesekan = $P_0 (\mu\alpha + Kx)$

$$= 1000 (0,046 + 0,015) = 61 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Penggelinciran pada ujung yang didongkrak} = 3 = (PL/AE)$$

di mana P = gaya pada kabel yang bersesuaian dengan penggelinciran

$$\text{Jadi } P = \left(\frac{3 \times 210 \times 10^3 \times 600}{10 \times 1000} \right) = 37800 \text{ N} = 37,8 \text{ kN}$$

$$\text{Kehilangan gaya akibat gesekan} = (600 \times 61) = 36600 \text{ N} = 36,6 \text{ kN}$$

$$\text{Kehilangan gaya total akibat gesekan dan penggelinciran} = (36,6 + 37,8) = 74,4 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya akhir pada kabel} = (600 - 74,4) = 525,6 \text{ kN}$$

$$\text{Persentase kehilangan prategang} = \frac{74,4}{600} \times 100 = 12,4\%$$

5.8 KEHILANGAN TOTAL YANG DIIZINKAN UNTUK DESAIN

Di dalam desain batang beton prategang sudah menjadi kebiasaan untuk mengasumsikan kehilangan tegangan total sebagai persentase dari tegangan awal serta memasukkannya dalam perhitungan desain. Oleh karena kehilangan prategang tergantung dari beberapa faktor, seperti misalnya sifat-sifat beton dan baja, metode perawatan, tingkat prategang, serta metode pemberian prategang, adalah sulit untuk menyama-ratakan jumlah kehilangan

prategang total yang pasti. Namun, nilai-nilai yang khas dari kehilangan tegangan total yang dapat dijumpai dalam kondisi-kondisi kerja normal sebagai yang dianjurkan oleh Lin⁹ dilukiskan di bawah ini.

Tipe kehilangan	Persentase kehilangan tegangan	
	Pratarik	Pascatarik
Perpendekan elastis dan lenturan beton	3	1
Rangkak beton	6	5
Susut beton	7	6
Rangkak pada baja	2	3
Jumlah	18	15

Dalam rekomendasi ini dianggap bahwa telah dilakukan pemberian tegangan berlebihan secara sementara untuk mengurangi relaksasi, dan untuk mengimbangi kehilangan-kehilangan gesekan dan angkur.

Kalau f_{pe} = tegangan efektif pada tendon setelah kehilangan
 f_{pi} = tegangan pada tendon pada saat transfer
 η = faktor reduksi untuk kehilangan prategang

$$\eta = \left(\frac{f_{pe}}{f_{pi}} \right)$$

Nilai-nilai η pada umumnya diambil sama dengan 0,85 untuk batang pratarik dan 0,80 untuk pascatarik.

Suatu cara penanganan yang melelahkan atas kehilangan prategang akibat rangkak, susut, dan relaksasi telah disajikan oleh Neville¹⁰ dengan meninjau berbagai parameter yang mempengaruhi, seperti rasio modulus, koefisien rangkak pada waktu yang tak-terbatas, susut ultimit, koefisien relaksasi, tegangan awal pada beton pada ketinggian tendon, dan tegangan relaksasi yang hakiki. Penelitian-penelitian lapangan jangka panjang atas kehilangan prategang pada gelagar jembatan beton pascatarik telah dilakukan oleh Marks dan Keifer¹¹ di mana kehilangan pada gelagar akibat rangkak dan susut yang diukur telah didapati maksimum pada ketinggian tendon.

CONTOH 5.14

Sebuah balok pratarik, lebar 200 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang oleh 10 kawat dengan diameter 7 mm yang diberi tegangan awal sampai 1200 N/mm² dengan pusat-pusatnya terletak 100 mm dari sofitnya. Carilah tegangan maksimum pada beton segera setelah transfer dengan hanya memperhitungkan perpendekan elastis beton.

Kalau beton tersebut mengalami perpendekan lebih lanjut akibat rangkak serta susut sedangkan terdapat suatu relaksasi sebesar 5 persen pada tegangan baja, perkirakan persentase kehilangan tegangan akhir pada kawat dengan memakai peraturan standar India (IS: 1343), dengan memakai data berikut:

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_c = 5700 (f_{cu})^{1/2}$$

$$f_{cu} = 42 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Koefisien rangkak } (\phi) = 1,6$$

$$\text{Regangan susut sisa total} = 3 \times 10^{-4}$$

Penyelesaian

$$A_c = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2 \quad E_c = 5700 (42)^{1/2} = 36900 \text{ N/mm}^2$$

$$I = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$\alpha_c = (E_s/E_c) = 5,7 \quad e = 50 \text{ mm}$$

$$P = (1200) (10 \times 38,5) = 462 \times 10^3 = 462 \text{ kN}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja =

$$f_c = \left[\frac{462 \times 10^3}{6 \times 10^4} + \frac{(462 \times 10^3 \times 50) 50}{45 \times 10^7} \right] = 10,3 \text{ N/mm}^2$$

Kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton

$$= (5,7 \times 10,3) = 58,8 \text{ N/mm}^2$$

Gaya pada kawat-kawat segera setelah transfer

$$= (1200 - 58,8) 38,5 = 440.000 \text{ N} = 440 \text{ kN}$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja =

$$f_c = \left[\frac{440 \times 10^3}{6 \times 10^4} + \frac{(440 \times 10^3 \times 50) 50}{45 \times 10^7} \right] = 9,55 \text{ N/mm}^2$$

Tipe kehilangan prategang

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Deformasi elastis | = 58,8 N/mm ² |
| 2. Rangkak beton = (1,6 × 9,55 × 5,7) | = 87,1 N/mm ² |
| 3. Susut beton = (3 × 10 ⁻⁴) (2,1 × 10 ⁵) | = 63,0 N/mm ² |
| 4. Relaksasi tegangan baja = (5/100 × 1200) | = 60,0 N/mm ² |

$$\text{Kehilangan total} = 268,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan akhir pada kawat-kawat} = (1200 - 268,9) = 931,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase kehilangan tegangan} = \left(\frac{268,9}{1200} \times 100 \right) = 22,4\%$$

CONTOH 5.15

Sebuah tiang pancang beton prategang, 250 mm persegi, mengandung 60 kawat pratarik masing-masing berdiameter 2 mm, terbagi rata pada seluruh penampang. Kawat-kawat tersebut diberi tegangan awal pada dasar prategang dengan suatu gaya total sebesar 300 kN. Hitunglah tegangan akhir pada beton serta persentase kehilangan tegangan pada baja setelah semua kehilangan diperhitungkan, dengan data-data berikut:

$$E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_c = 32 \text{ kN/mm}^2$$

Perpendekan akibat rangkak = 30×10^{-6} mm/mm per N/mm² tegangan

Susut total = 200×10^{-6} per satuan panjang

Relaksasi tegangan baja = 5 persen dari tegangan awal

Gaya prategang, $P = 300 \text{ kN}$

$$\text{Tegangan awal rata-rata pada beton} = \left(\frac{300 \times 10^3}{250 \times 250} \right) = 4,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Rasio modulus, } \alpha_e = \left(\frac{E_s}{E_c} \right) = 6,58$$

$$\text{Tegangan awal pada kawat baja} = \left(\frac{300 \times 10^3}{188,4} \right) = 1590 \text{ N/mm}^2$$

Kehilangan tegangan

$$\begin{aligned} 1. \text{ Deformasi elastis} &= (6,58 \times 4,8) &= 31,5 \text{ N/mm}^2 \\ 2. \text{ Rangkak beton} &= (30 \times 10^{-6}) 4,8 \times 210 \times 10^3 &= 30 \text{ N/mm}^2 \\ 3. \text{ Susut beton} &= (200 \times 10^{-6}) 210 \times 10^3 &= 42 \text{ N/mm}^2 \\ 4. \text{ Relaksasi tegangan baja} &= (5/100 \times 1590) &= 79,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Kehilangan total} &= 183 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Prategang efektif} = (1590 - 183) = 1407 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan akhir pada beton} = \left[\frac{(1407)(188,4)}{250 \times 250} \right] = 4,26 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase kehilangan tegangan pada baja} = \left(\frac{183}{1590} \times 100 \right) = 11,6\%$$

CONTOH 5.16

Sebuah balok beton prategang, lebar 200 mm dan tinggi 300 mm, diberi prategang dengan kawat-kawat (luas = 160 mm²) yang diletakkan dengan eksentrisitas konstan 50 mm, yang membawa suatu tegangan awal sebesar 1000 N/mm². Bentangan balok tersebut adalah 10 m. Hitunglah persentase kehilangan tegangan pada kawat kalau (a) balok tersebut adalah pratarik, dan (b) balok tersebut adalah pascatarik, dengan memakai data-data berikut:

$$\begin{aligned} E_s &= 210 \text{ kN/mm}^2 \\ E_c &= 35 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

Relaksasi tegangan baja = 5 persen dari tegangan awal

Susut beton = 300 × 10⁻⁶ untuk pratarik dan
200 × 10⁻⁶ untuk pascatarik

Regangan rangkak ultimit = 40 × 10⁻⁶ dan 20 × 10⁻⁶ mm/mm per N/mm² masing-masing untuk pratarik dan pascatarik.

Peggelinciran pada angkur = 1 mm.

Koefisien gesekan untuk pengaruh gelombang = 0,0015 per m

Gaya prategang, P = 160 × 10³ N

Luas penampang, A = 6 × 10⁴ mm²

Rasio modulus, α_e = (210/35) = 6

$$I = \left(\frac{200 \times 300^3}{12} \right) = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Tegangan pada beton pada ketinggian baja

$$= \left[\frac{(160 \times 10^3)}{(6 \times 10^4)} + \frac{(160 \times 10^3 \times 50) 50}{(45 \times 10^7)} \right] = 7,0 \text{ N/mm}^2$$

Bermacam-macam kehilangan tegangan dirangkum dalam tabel di bawah ini.

Kehilangan Tegangan

Tipe kehilangan	Balok pratarik N/mm ²	Balok pascatarik N/mm ²
1. Deformasi elastis beton	6 × 7,0 = 42,00	—
2. Relaksasi tegangan pada baja	$\left(\frac{5}{100} \times 1000 \right) = 50,00$	$\left(\frac{5}{100} \times 1000 \right) = 50,00$
3. Rangkak beton	40 × 10 ⁻⁶ × 7,00 × 210 × 10 ³ = 58,80	20 × 10 ⁻⁶ × 7,00 × 210 × 10 ³ = 29,40
4. Susut beton	300 × 10 ⁻⁶ × 210 × 10 ³ = 63,00	200 × 10 ⁻⁶ × 210 × 10 ³ = 42,00
5. Peggelinciran pada angkur	—	$\left(\frac{1 \times 210 \times 10^3}{10 \times 1000} \right) = 21,0$
6. Pengaruh gesekan	—	1000 × 0,0015 × 10 = 15,0
7. Kehilangan tegangan total	213,80	157,40
8. Persentase kehilangan tegangan	21,38%	15,74%

