



TKS 422314

Struktur Beton Prategang

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

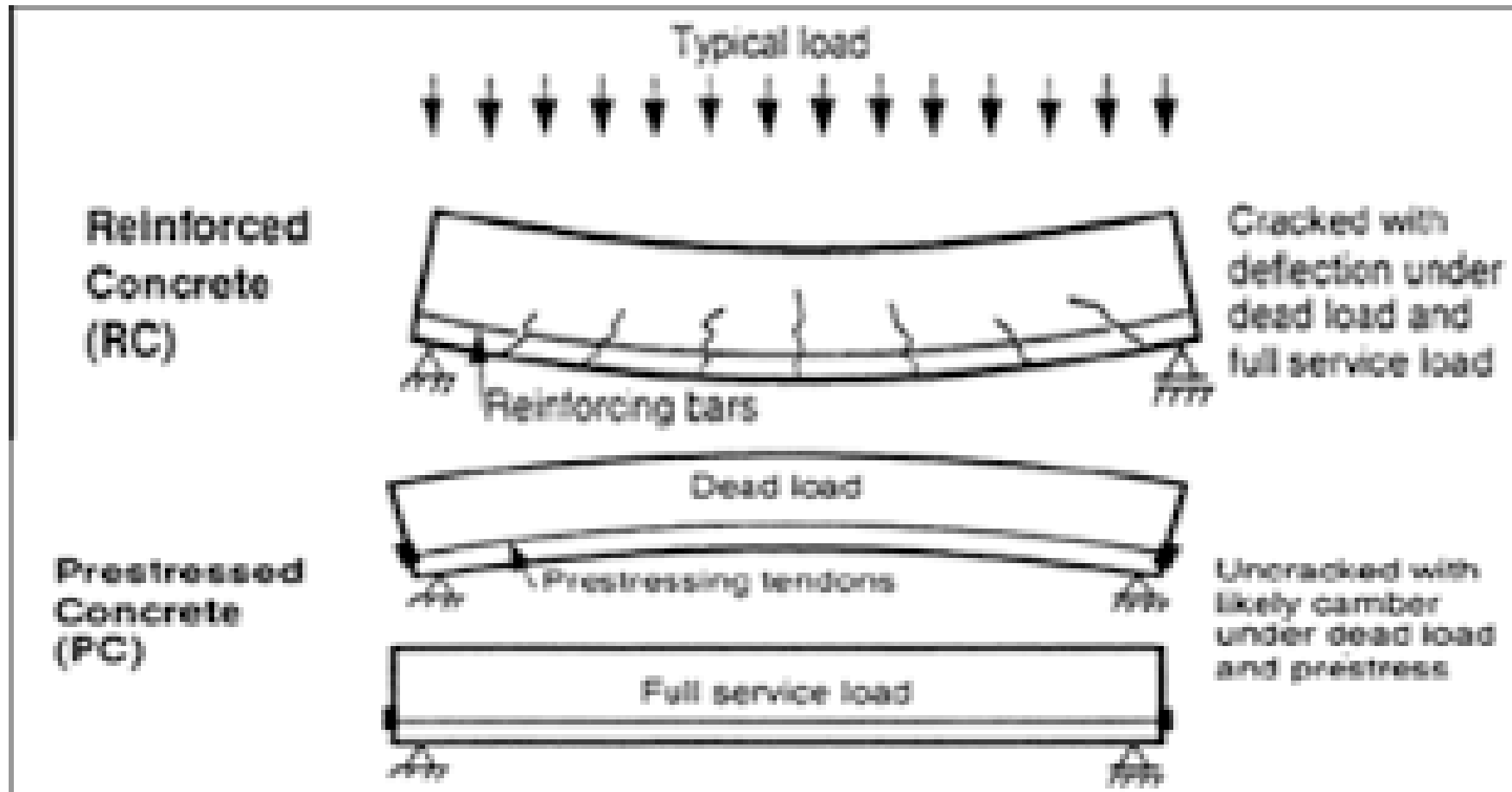


© buildingscience.com

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Available on: <http://bit.ly/S1UnsriBetonPrategang>

Perbedaan lendutan balok beton bertulang dan balok prategang



Struktur Beton Prategang

Jalan Layang KA Medan

Sumber: Delitriana (2020)



Struktur Beton Prategang

Jembatan Pedamaran I Bagansiapiapi, Riau

Sumber: Delitriana (2020)



Struktur Beton Prategang



Jembatan Pedamaran II Bagansiapiapi, Riau

Sumber: Delitriana (2020)



Jembatan Jalan Layang Khusus Busway Adam Malik

Sumber: Delitriana (2020)



Long Span LRT Kuningan, Panjang 148 meter di atas *flyover*

Sumber: Delitriana (2020)

Konsep dasar

Fungsi gaya prategang

- ❖ Beton prategang (*pre-stressed*) adalah beton bertulang yang menerapkan **beban tekan awal** pada struktur untuk **mengurangi** atau menghilangkan **gaya tarik internal** dan dengan demikian **mengontrol** atau **menghilangkan retak**. Beban tekan awal prategang berasal dari **tulangan baja/strand/tendon** yang menekan beton.
- ❖ Karena retak berkurang atau tidak terjadi, maka beton prategang bersifat jauh **lebih kaku** daripada beton bertulang yang umumnya mengalami retak.
- ❖ Gaya prategang dapat menahan beban eksternal dan karenanya dapat secara signifikan **mengurangi** atau bahkan menghilangkan **defleksi**.

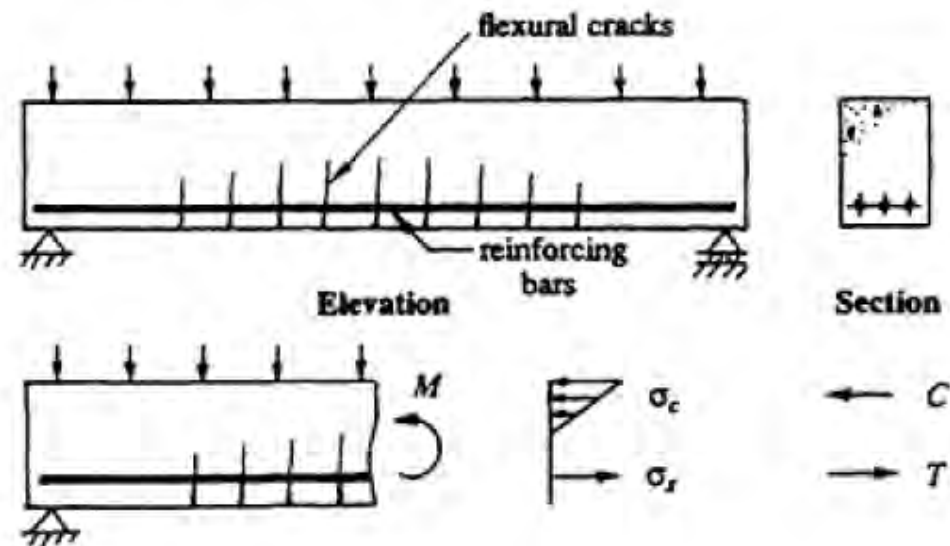


Figure 1.1 A reinforced concrete beam.

Konsep dasar

Tegangan internal

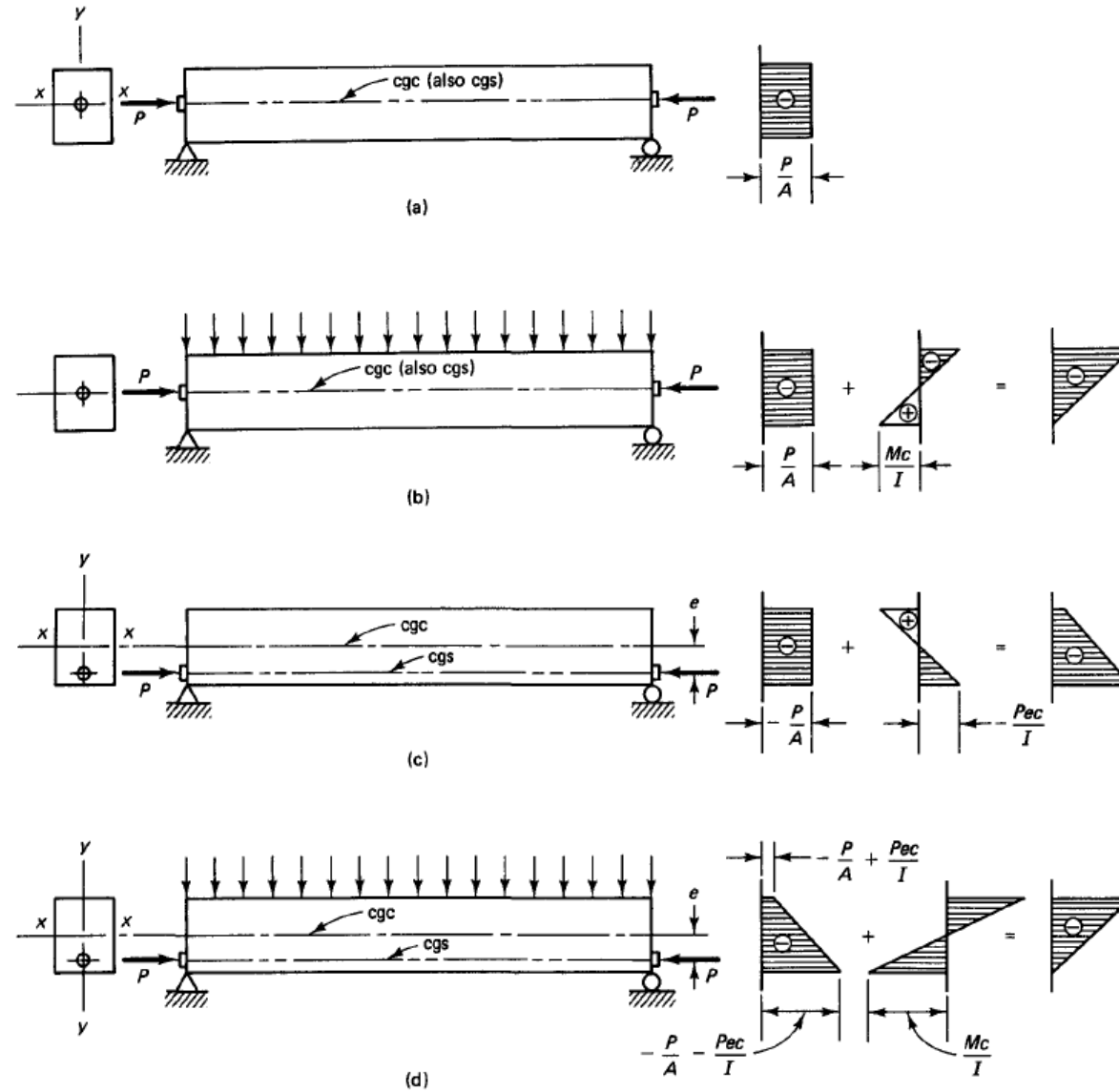


Figure 1.2 Concrete fiber stress distribution in a rectangular beam with straight tendon. (a) Concentric tendon, prestress only. (b) Concentric tendon, self-weight added. (c) Eccentric tendon, prestress only. (d) Eccentric tendon, self-weight added.

Sumber: Nawy (2010)

Konsep dasar

Tegangan internal

Untuk gambar 1.2.b

Kapasitas tegangan tekan balok untuk menahan beban eksternal yang ditahan oleh gaya prategang konsentris.

Tegangan di serat atas:

$$f_t = -\frac{P}{A} - \frac{M c}{I_g}$$

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = -\frac{P}{A} + \frac{M c}{I_g}$$

dengan:

f_t : tegangan di serat atas beton (N/mm² atau MPa)

f_b : tegangan di serat bawah beton (N/mm² atau MPa)

P : gaya tekan prategang (N)

$c = \frac{1}{2}h$ untuk penampang segi empat (mm)

I_g : momen inersia gross penampang beton (mm⁴)

$I_g = \frac{1}{12}bh^3$ untuk penampang persegi empat (mm⁴)

Konsep dasar

Tegangan internal

Untuk gambar 1.2.d

Tendon prategang ditempatkan secara eksentrik di bawah sumbu netral, untuk menimbulkan tegangan tarik pada serat atas karena gaya prategang.

Tegangan di serat atas:

$$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{P e c}{I_g} - \frac{M c}{I_g}$$

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{P e c}{I_g} + \frac{M c}{I_g}$$

dengan:

c = $\frac{1}{2}h$ untuk penampang segi empat (mm)

e : eksentrisitas gaya prategang ke c.g.c.

f_t : tegangan di serat atas beton (N/mm² atau MPa)

f_b : tegangan di serat bawah beton (N/mm² atau MPa)

I_g : momen inersia gross penampang beton (mm⁴)

$I_g = \frac{1}{12}bh^3$ untuk penampang persegi empat (mm⁴)

P : gaya tekan prategang (N)

c.g.c. : *center of gravity of concrete* (pusat gravitasi beton)

c.g.s. : *center of gravity of steel* (pusat gravitasi baja)

Konsep dasar

Pengaruh gaya tekan awal dan efektif

Perbandingan gaya tekan awal (*initial*) dan gaya tekan efektif (setelah kehilangan sebagian gaya prategang):

$$\gamma = \frac{P_e}{P_i}$$

Radius girasi penampang kuadrat:

$$r^2 = \frac{I_g}{A_c}$$

Momen total:

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L$$

Tegangan di serat atas akibat gaya prategang dan momen total:

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e c_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S_t}$$
$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e c_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b}$$

dengan:

M_D : momen akibat berat sendiri (N.mm)

M_{SD} : momen akibat beban *superimposed dead load*, misalnya lantai (N.mm)

M_L : momen akibat beban hidup, termasuk beban benturan (*impact*) dan beban gempa (N.mm)

S_t : modulus penampang atas (*top*);
 $S_t = \frac{1}{6} b c_t^2$ (mm³)

S_b : modulus penampang bawah (*bottom*);
 $S_b = \frac{1}{6} b c_b^2$ (mm³)

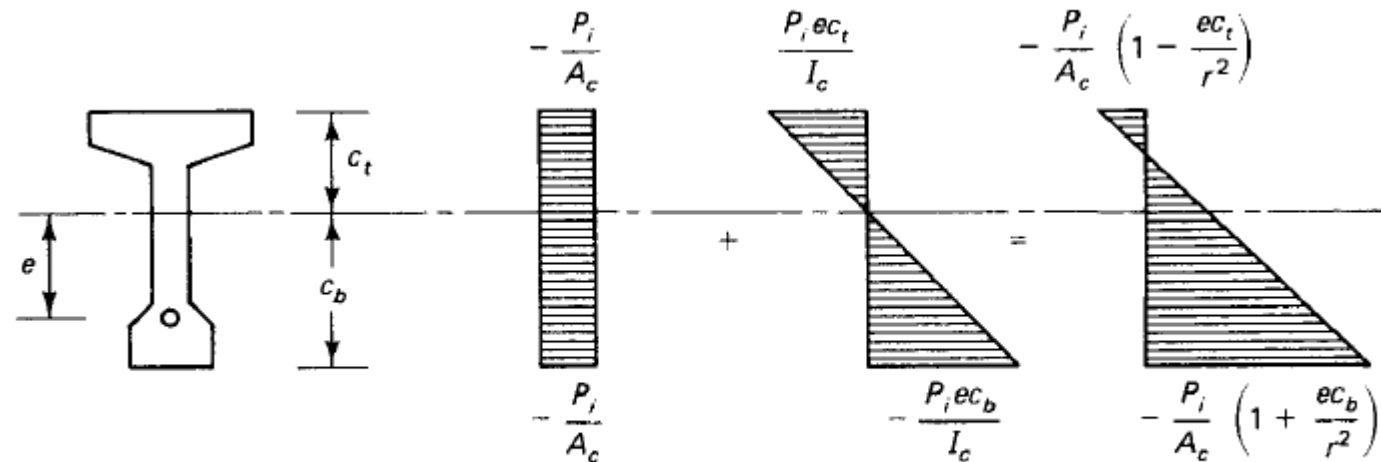
P_e : gaya prategang efektif setelah memperhitungkan kehilangan sebagian gaya prategang (N)

P_i : gaya prategang awal (*initial*; N)

Konsep dasar

Tegangan

- Dalam analisis, balok dianggap sebagai beton tanpa tulangan baja (non-prategang dan prategang) serta berperilaku elastis.
- Gaya prategang dianggap sebagai gaya tekan eksternal, dengan gaya tarik konstan T pada *tendon/strand* sepanjang bentang balok.
- Efek beban gravitasi eksternal diabaikan.
- Persamaan kesetimbangan $\Sigma H = 0$ dan $\Sigma M = 0$



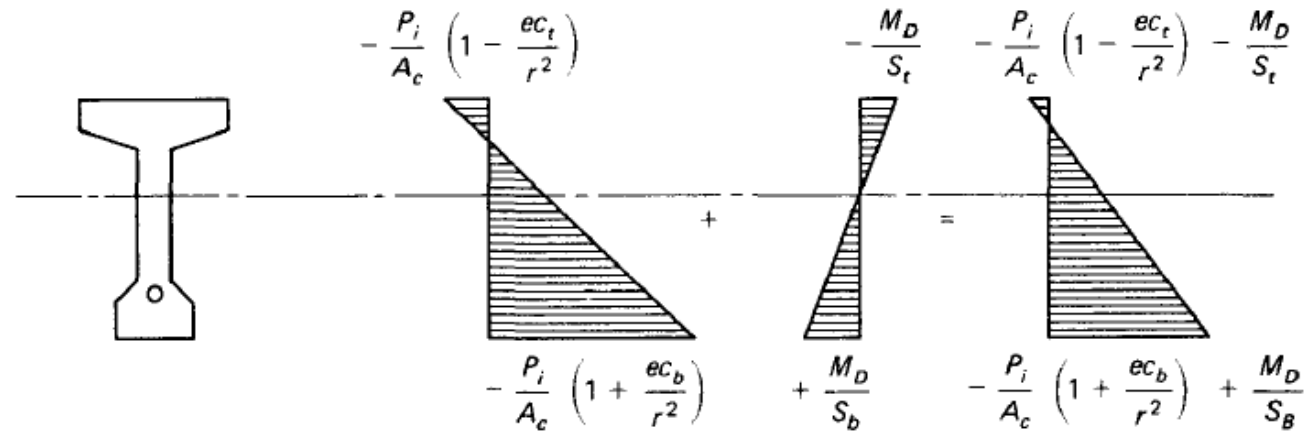
(a) **Tegangan awal (*initial*)**

Figure 1.4 Elastic fiber stresses due to the various loads in a prestressed beam.

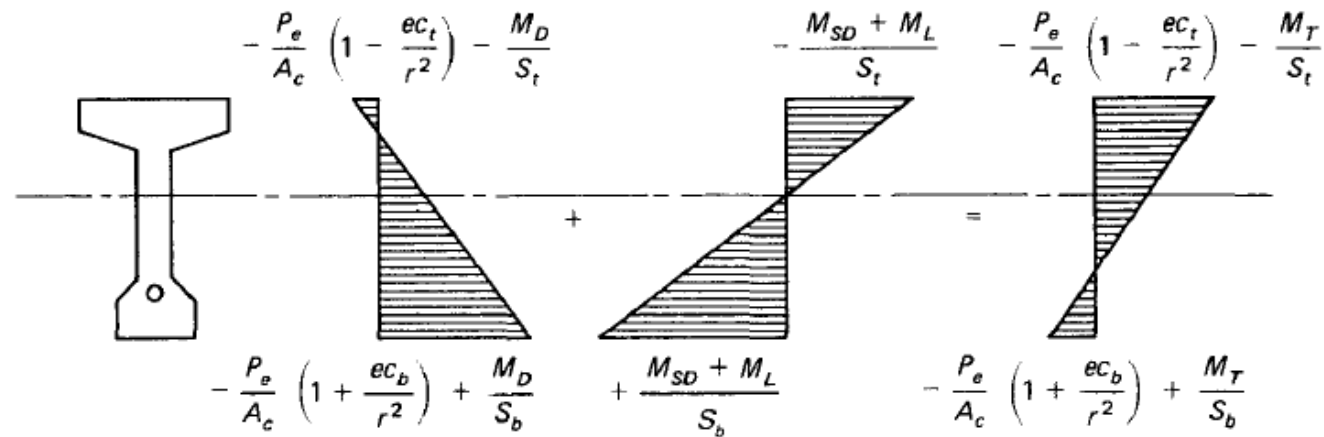
(a) Initial prestress before losses.

Sumber: Nawy (2010)

Konsep dasar Tegangan



(b) **Tambahan tegangan akibat berat sendiri**



(c) **Tegangan layan saat menahan berbagai beban**

Figure 1.4 Elastic fiber stresses due to the various loads in a prestressed beam. (a) Initial prestress before losses. (b) Addition of self-weight. (c) Service load at effective prestress.

Sumber: Nawy (2010)

Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

Garis relatif aksi gaya tekan C dan gaya tarik T dalam balok beton bertulang dibandingkan dengan balok beton prategang.

Gaya tarik T terbatas hanya ketika beban melintang dan eksternal lainnya bekerja.

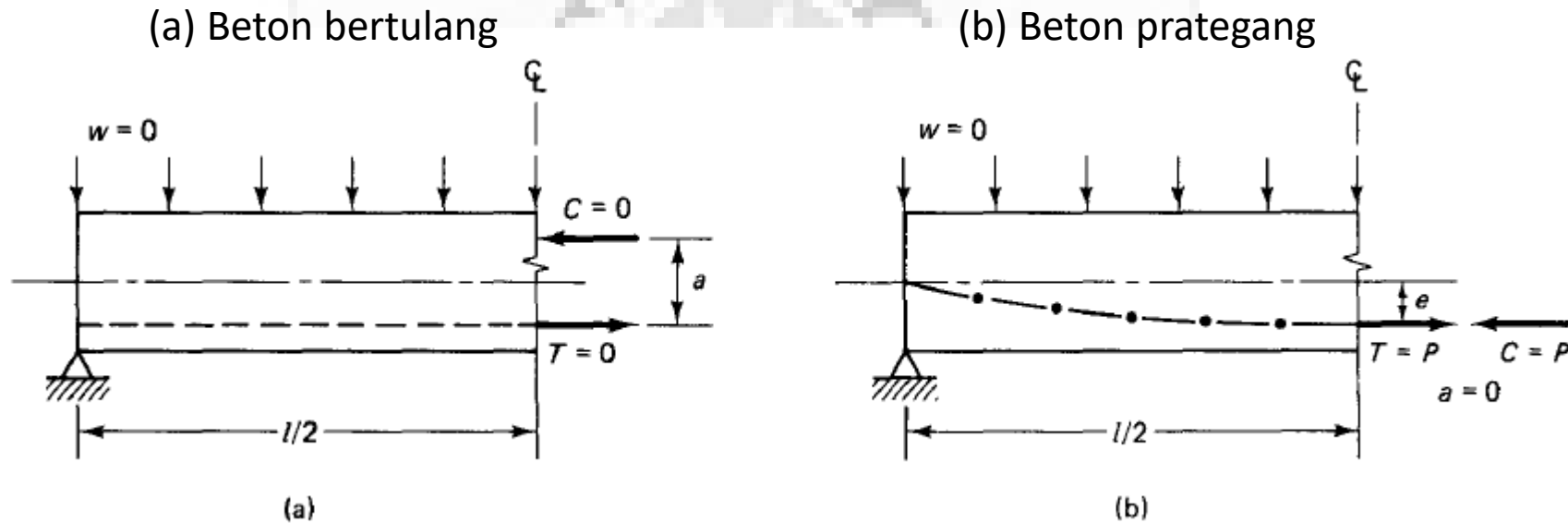


Figure 1.5 Comparative free-body diagrams of a reinforced concrete (R.C.) beam and a prestressed concrete (P.C.) beam. (a) R.C. beam with no load. (b) P.C. beam with no load.

Sumber: Nawy (2010)

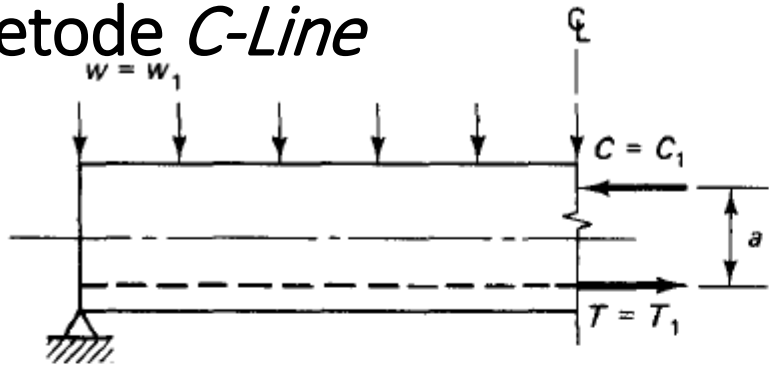
P.C.: *prestressed concrete* (beton prategang)

R.C.: *reinforced concrete* (beton bertulang)

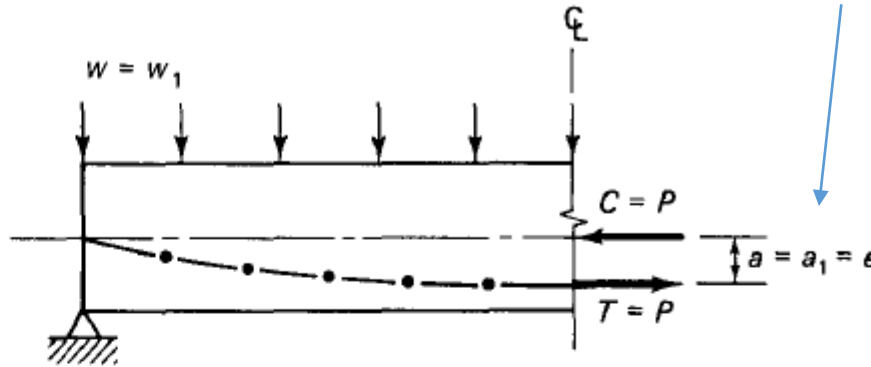
Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

Lengan momen a berubah dari nilai $a = 0$ [gambar (b)] pada prategang menjadi maksimum pada saat ada beban *superimposed* w [gambar (d)].



(c)



(d)

Semakin besar gaya prategang (P), maka gaya tekan beton (C) semakin besar.

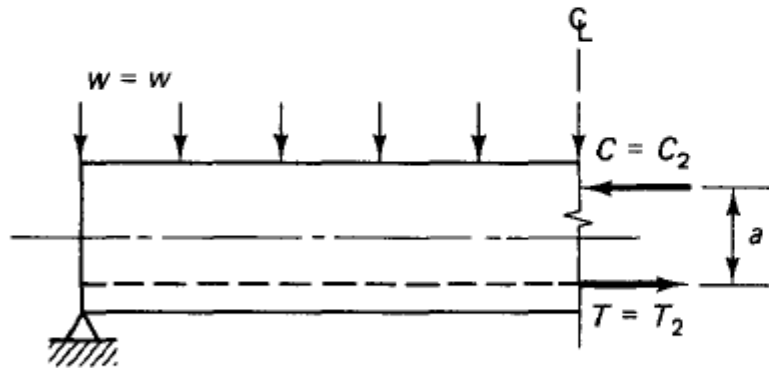
Jika gaya tekan beton (C) besar, maka posisi gaya tekan C makin rendah

[gambar (d)]. Hal ini diakibatkan volume beton yang tertekan semakin besar, sehingga tinggi blok tekan beton semakin besar.

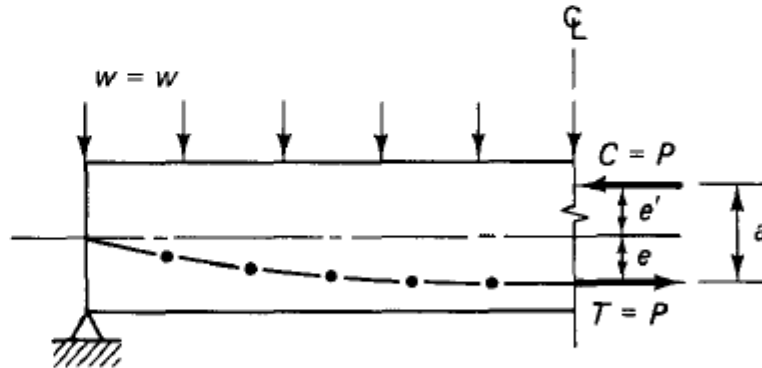
Catatan: beban w pada gambar (d) > w pada gambar (f)

(c & e) Beton bertulang

(d & f) Beton prategang



(e)



(f)

Semakin kecil gaya prategang (P), maka gaya tekan beton (C) semakin kecil.

Jika gaya tekan beton (C) kecil, maka posisi gaya tekan C makin tinggi [gambar (f)].

Figure 1.5 Comparative free-body diagrams of a reinforced concrete (R.C.) beam and a prestressed concrete (P.C.) beam. (a) R.C. beam with no load. (b) P.C. beam with no load. (c) R.C. beam with load w_1 . (d) P.C. beam with load w_1 . (e) R.C. beam with typical load w . (f) P.C. beam with typical load w .

Sumber: Nawy (2010)

Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

Jarak *C-line* (garis pusat tekanan) garis T bervariasi, sesuai nilai a pada suatu lokasi penampang.

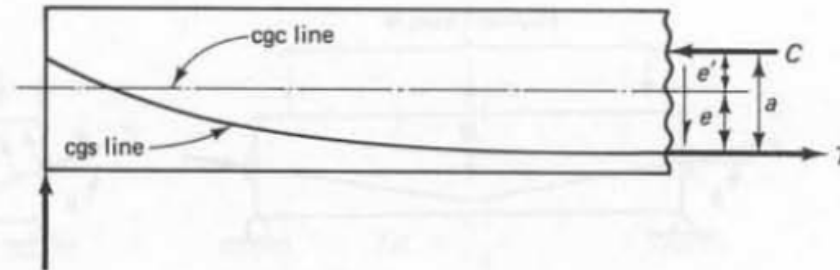


Figure 1.6 Free-body diagram for the C-line (center of pressure).

Sumber: Nawy (2010)

Nilai momen:

$$M = Ca = Ta$$

Eksentrisitas (e) diketahui, sehingga

$$e' = a - e$$

Karena $C = T$ dan $a = M/T$, maka

$$e' = \frac{M}{T} - e$$

Tegangan di serat atas beton:

$$f_t = -\frac{C}{A_c} - \frac{C e' c_t}{I_c}$$

Tegangan di serat bawah beton:

$$f_b = -\frac{C}{A_c} + \frac{C e' c_b}{I_c}$$

dengan:

A_c : luas penampang balok (mm²)

I_c : momen inersia penampang beton saja (mm⁴)

I_g : momen inersia gross penampang beton (mm⁴)

$$A_c = bh$$

$$I_c = A_c r^2 = I_g$$

$$r^2 = \frac{I_g}{A_c}$$

Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

Jarak *C-line* (garis pusat tekanan) garis T bervariasi, sesuai nilai a pada suatu lokasi penampang.

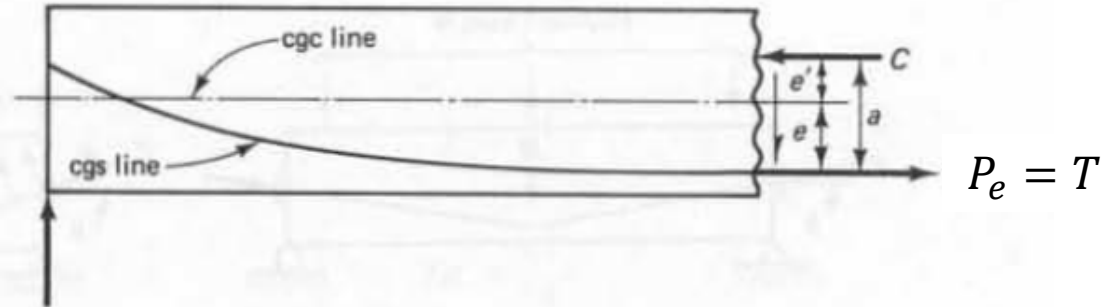


Figure 1.6 Free-body diagram for the C-line (center of pressure).

Sumber: Nawy (2010)

Karena gaya prategang efektif (P_e) sama dengan T , dan $C = T$, maka Tegangan di serat atas beton:

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e e' c_t}{I_c}$$

Tegangan di serat bawah beton:

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e e' c_b}{I_c}$$

Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

Karena momen inersia

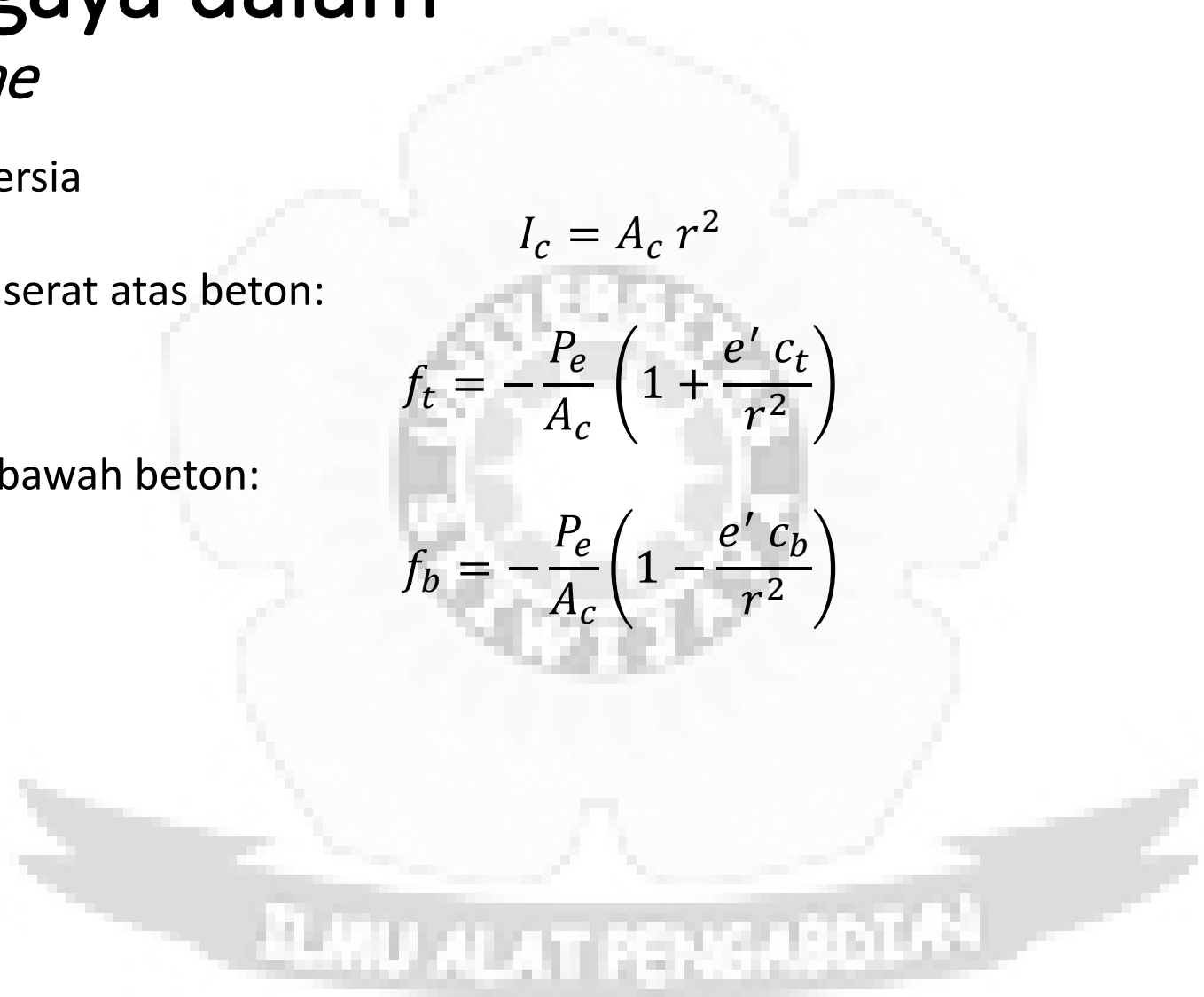
$$I_c = A_c r^2$$

Maka tegangan di serat atas beton:

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 + \frac{e' c_t}{r^2} \right)$$

Tegangan di serat bawah beton:

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e' c_b}{r^2} \right)$$



Analisis gaya dalam

Metode *C-Line*

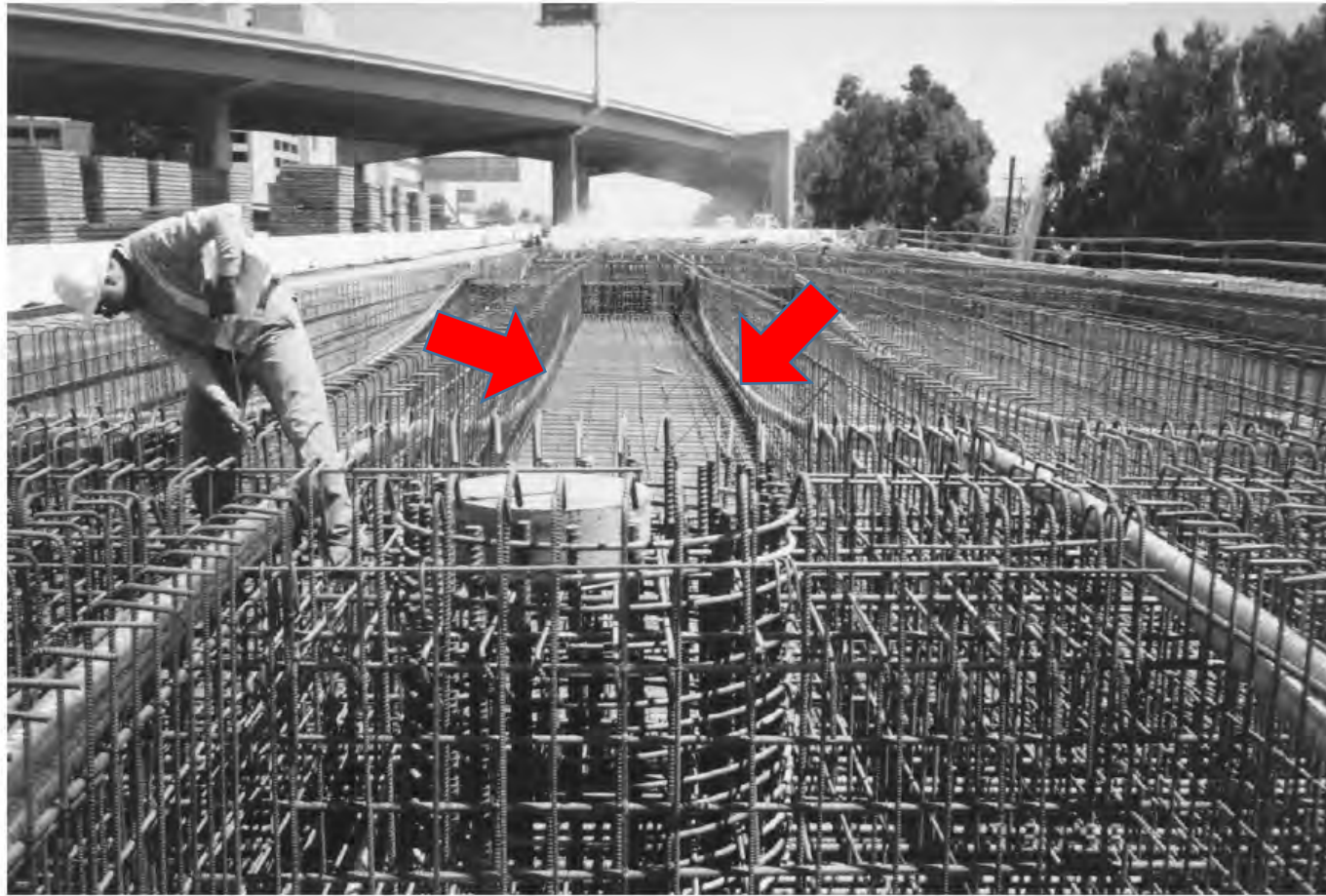


FIGURE 10.2 A post-tensioned box-girder bridge under construction.

Sumber: Duan, dkk. (2000)

Analisis gaya dalam

Metode kesetimbangan gaya

$$R = P_{\text{vertikal}} = P \sin \theta$$

Gaya horisontal:

$$P' = P \cos \theta$$

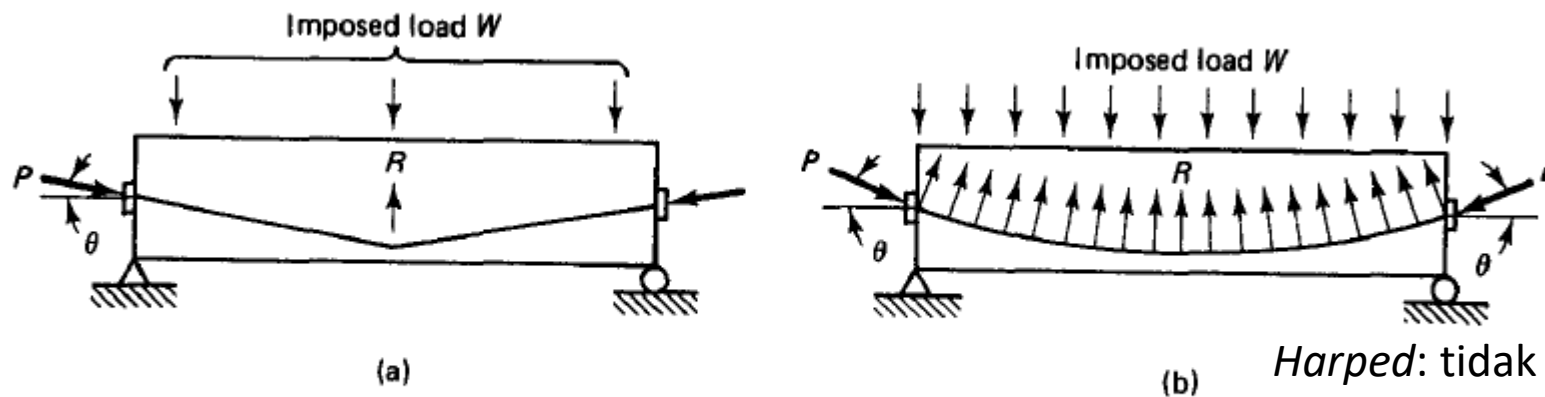
Pada pertengahan bentang, $\theta = 0^\circ$, maka

$$P' = P$$

dengan:

R : reaksi penyeimbang beban (N)

P : gaya prategang (N)



(b) *Harped*: tidak dibungkus
Draped: dibungkus dalam selongsong

Figure 1.7 Load-balancing forces. (a) Harped tendon. (b) Draped tendon.

Analisis gaya dalam

Metode kesetimbangan gaya

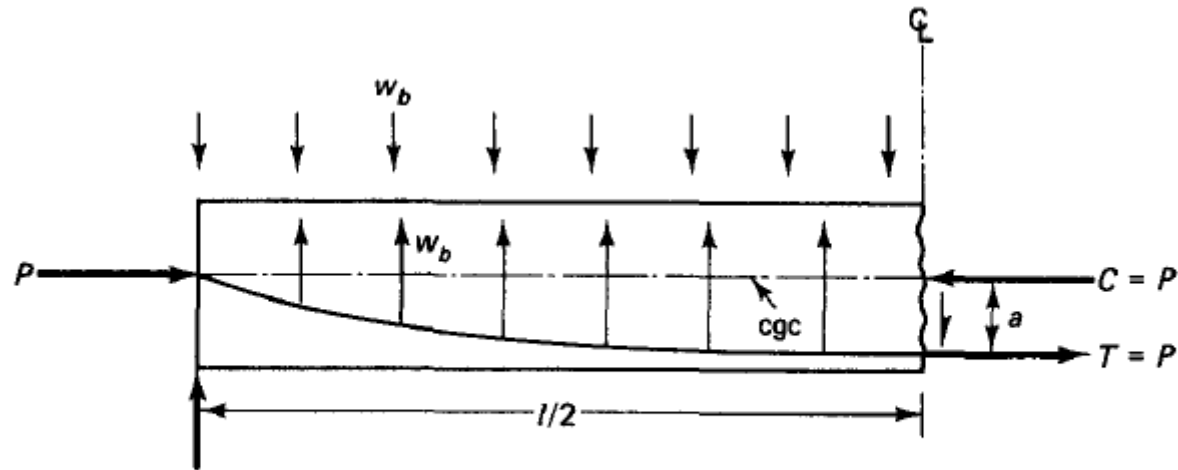


Figure 1.9 Load-balancing force on free-body diagram.

Sumber: Nawy (2010)

Momen penyeimbang (*balance*)

$$: M = \frac{1}{8} w_b l^2 \text{ dan } M = P a$$

Maka beban penyeimbang (*balance*)

$$: w_b = \frac{8 P a}{l^2}$$

Beban total

$$: w_T = w_D + w_{SD} + w_L$$

Beban penyebab ketidakseimbangan (*unbalance*): $w_{ub} = w_T - w_b = w_D + w_{SD} + w_L - w_b$

$$\text{unbalance} = \text{total} - \text{balance} = \text{Dead} + \text{Superimposed Dead} + \text{Life} - \text{balance}$$

Analisis gaya dalam

Metode kesetimbangan gaya

Tegangan di serat atas beton di tengah bentang:

$$f_t = -\frac{P'}{A_c} - \frac{M_{ub}}{S_t}$$

Tegangan di serat bawah beton di tengah bentang:

$$f_b = -\frac{P'}{A_c} + \frac{M_{ub}}{S_b}$$

dengan:

$w_T; w_D; w_{SD}; w_L$: beban merata total; mati; *superimposed dead*; hidup (N/mm²)

$P' = P \cos \theta$: gaya prategang horizontal (N)

A_c : luas penampang balok; $A_c = b h$ (mm²)

S_t : modulus penampang atas (*top*); $S_t = \frac{1}{6} b c_t^2$ (mm³)

S_b : modulus penampang bawah (*bottom*); $S_b = \frac{1}{6} b c_b^2$ (mm³)

Keterangan

dengan:

C	: gaya tekan beton (N)
C_s	: gaya tekan baja tulangan (N)
d_n	: jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral (mm)
d_p	: jarak dari serat tekan terluar ke pusat massa baja prategang (<i>tendon/strand</i> ; mm)
d_{s1}	: jarak dari serat tekan terluar ke pusat massa tulangan baja tekan (mm)
d_{s2}	: jarak dari serat tekan terluar ke pusat massa tulangan baja tarik (mm)
d_z	: jarak dari serat tekan terluar ke gaya tekan beton (mm)
E_c, E_s, E_p	: modulus elastis beton, baja tulangan, dan baja prategang (MPa)
f'_c	: kuat tekan beton karakteristik pada umur 28 hari (MPa)
f_p	: kuat tarik baja prategang <i>ultimate</i> (MPa)
f_y	: kuat leleh baja tulangan (MPa)
T_p	: gaya tarik pada baja prategang (N)
T_s	: gaya tarik pada baja tulangan (N)
ϵ_o	: regangan tekan di serat terluar beton (mm/mm)
ϵ_{ce}	: regangan beton yang terjadi (<i>instantaneous</i>) (mm/mm)
ϵ_{oi}	: regangan tekan awal di serat terluar beton (mm/mm)
ϵ_{pe}	: regangan baja prategang efektif (mm/mm)
ϵ_{pt}	: regangan tarik beton di level baja prategang setelah retak dan momen <i>ultimate</i> (mm/mm)
ϵ_{pu}	: regangan baja prategang kondisi <i>ultimate</i> (mm/mm)
ϵ_{s1}	: regangan baja tekan (mm/mm)
ϵ_{s2}	: regangan baja tarik (mm/mm)
σ_o	: tegangan pada saat pembebanan pertama (MPa)
σ_p	: tegangan pada baja prategang (MPa)
σ_s	: tegangan pada baja tulangan yang diijinkan (MPa)
σ_{sc}	: tegangan pada baja tulangan tekan (MPa)
σ_{st}	: tegangan pada baja tulangan tarik (MPa)

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

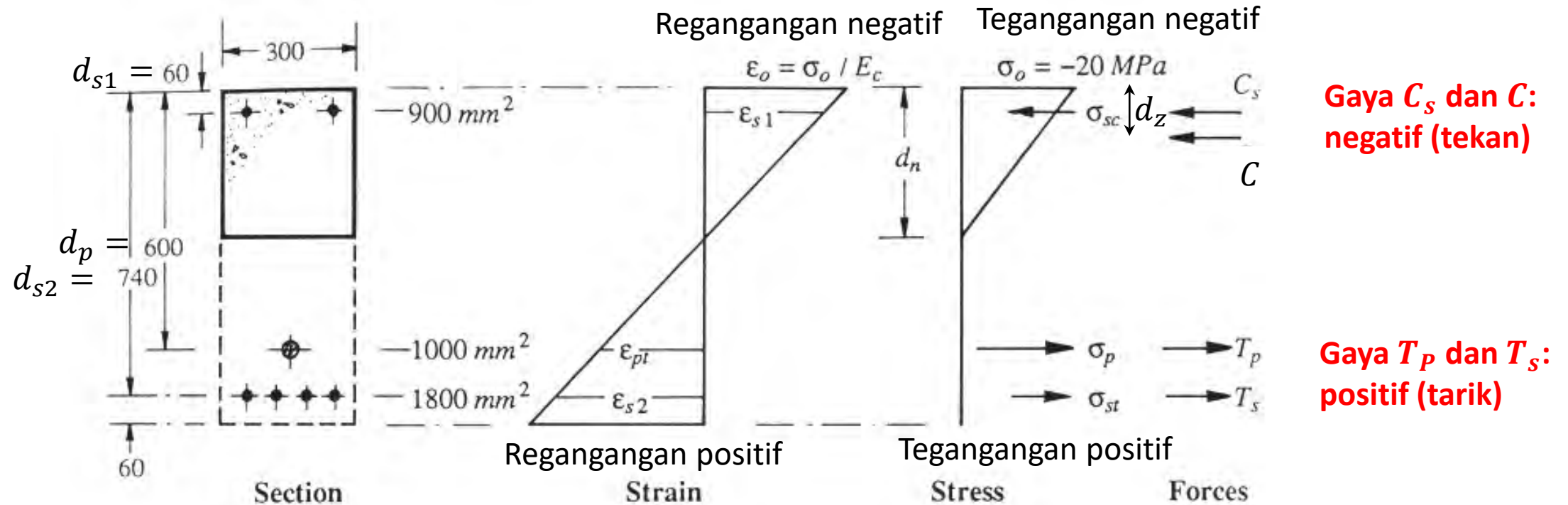


Figure 3.11 Short-term strain and stress on the cracked section of [Example 3.4](#).

Sumber: Gibert dan Mickleborough (2005)

$$T_p + T_s + C + C_s = 0$$

$$(+) + (+) + (-) + (-) = 0 \quad (3.26)$$

and moment equilibrium requires that

$$M = T_p d_p + T_s d_{s2} + C d_z + C_s d_{s1} = 0$$

$$M = (+) + (+) + (-) + (-) \quad (3.27)$$

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

C is the volume of the triangular compressive stress block acting over the area A' above the neutral axis. If A' is rectangular (b wide and d_n deep), then

$$C = \frac{1}{2} \sigma_{oi} b d_n = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{oi} b d_n \quad \leftarrow \sigma_{oi} = E_c \epsilon_{oi}$$

σ_{oi} : tegangan negatif (3.28)
 ϵ_{oi} : regangan negatif

$$(-) = (-) = (-)$$

From similar triangles, the strains at the levels of the non-prestressed steel are

$$\epsilon_{s2} = \frac{-\epsilon_{oi}(d_{s2} - d_n)}{d_n} \quad \text{and} \quad \epsilon_{s1} = \frac{\epsilon_{oi}(d_n - d_{s1})}{d_n}$$

$$(+) = -(-) \qquad (-) = (-)$$

and therefore the forces in the conventional reinforcement are

$$T_s = \sigma_{s2} A_{s2} = \epsilon_{s2} E_s A_{s2} = E_s A_{s2} \frac{-\epsilon_{oi}(d_{s2} - d_n)}{d_n} \quad (3.29)$$

$$(+) = -(-)$$

$$C_s = \sigma_{s1} A_{s1} = \epsilon_{s1} E_s A_{s1} = E_s A_{s1} \frac{\epsilon_{oi}(d_n - d_{s1})}{d_n} \quad (3.30)$$

$$(-) = (-)$$

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

The strain in the bonded prestressing steel is equal to the sum of three strain components. The first component is the tensile strain caused by the effective prestress, ϵ_{pe} i.e. the strain that exists in the steel prior to the application of any external moment:

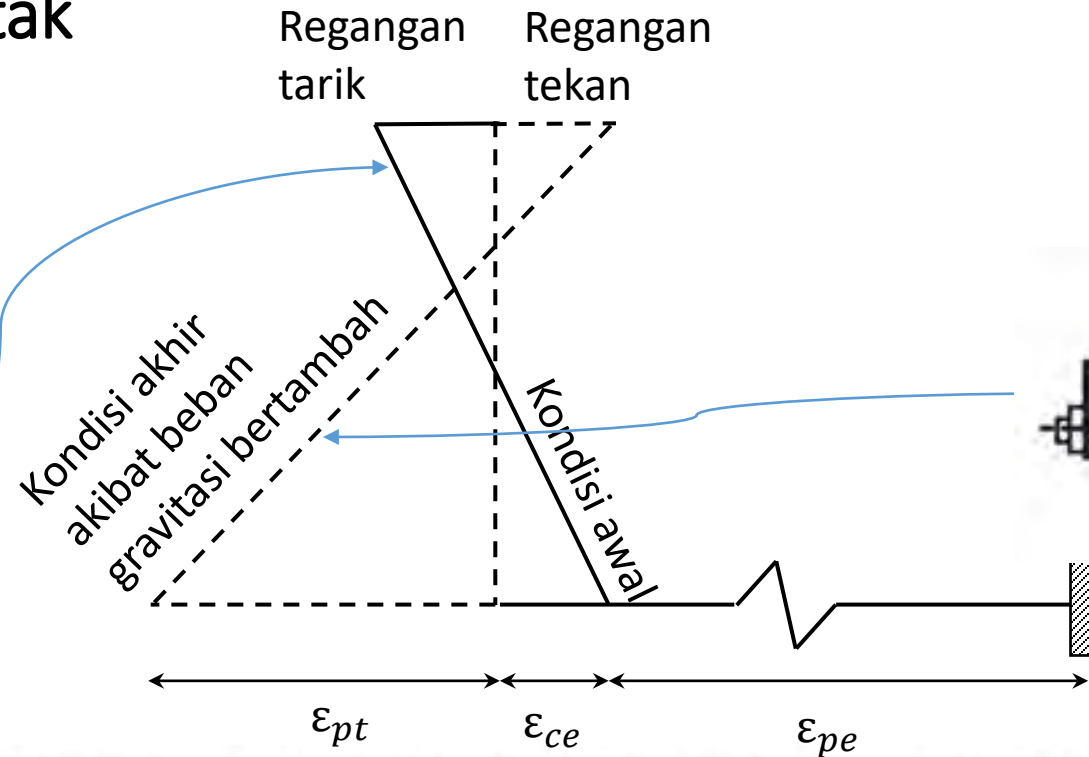
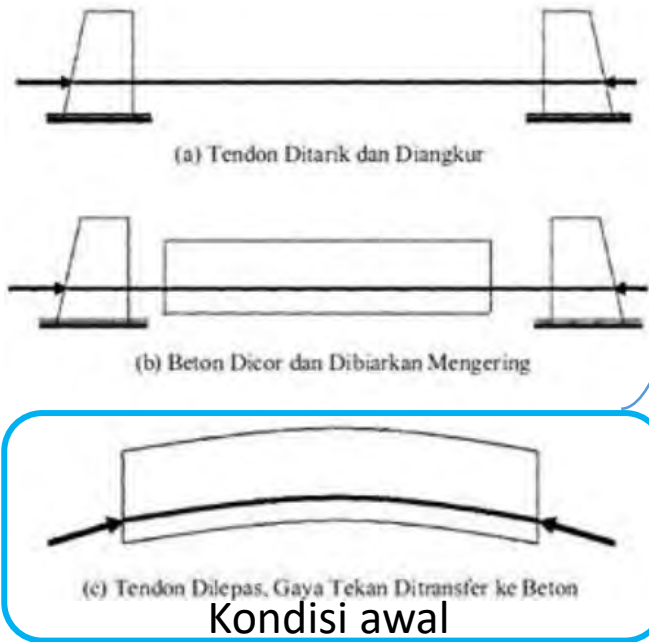
$$\epsilon_{pe} = \frac{P_e}{A_p E_p} \quad (3.31)$$

Before the external moment is applied, the instantaneous compressive strain in the concrete at the level of the prestressing steel is

$$\epsilon_{ce} = \frac{1}{E_c} \left(-\frac{P_e}{A} - \frac{P_e e^2}{I} \right) \quad (3.32)$$

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak



As the external moment increases, the strain in the concrete at the steel level increases from compressive (ϵ_{ce}) to tensile (ϵ_{pt}). If perfect bond exists between the tendon and the concrete, the prestressing steel strain increases by this same amount, i.e. $|\epsilon_{ce}| + \epsilon_{pt}$. From similar triangles,

$$\epsilon_{pt} = \frac{-\epsilon_{oi}(d_p - d_n)}{d_n} \quad (3.33)$$

Jika beban semakin besar, maka regangan beton pada level baja prategang meningkat dari regangan tekan (ϵ_{ce}) menjadi regangan tarik (ϵ_{pt}).

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

The total strain in the prestressed steel is therefore given by

$$\epsilon_p = \epsilon_{pe} + |\epsilon_{ce}| + \epsilon_{pr} \quad (3.34)$$

and the force in the prestressing steel is

$$T_p = E_p A_p \left(\epsilon_{pe} + |\epsilon_{ce}| + \frac{-\epsilon_{oi}(d_p - d_n)}{d_n} \right) \quad (3.35)$$

$$(+)= (+) \quad [(+) + (+) \quad + \{-(-)\}]$$

Analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

Langkah perhitungan:

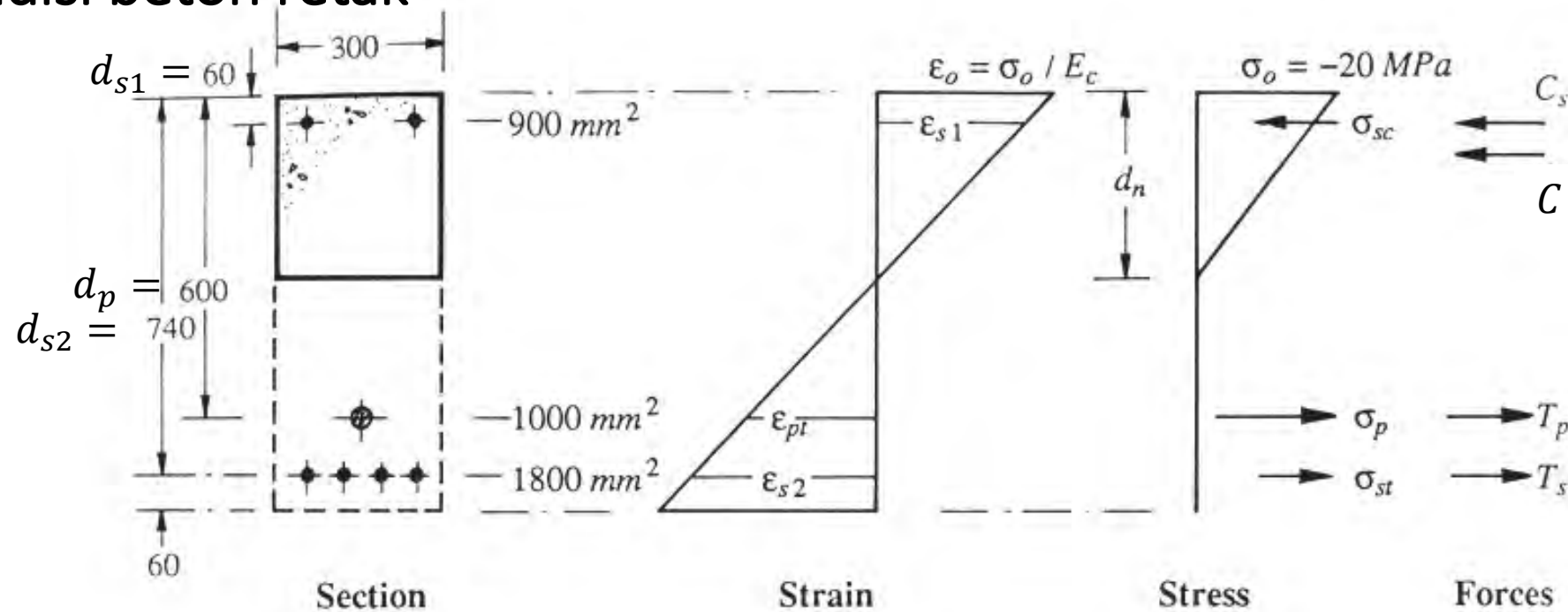
1. Asumsikan nilai regangan ε_{oi} ; misalnya $\varepsilon_{oi} = \frac{0,5f'_c}{E_c}$
2. Asumsikan suatu nilai d_n
3. Hitung nilai regangan (ε), tegangan (σ), dan gaya pada baja tulangan (T_s) dan gaya pada beton (C)
4. Cek kesetimbangan gaya horisontal. Apakah persamaan (3.26) terpenuhi?
Jika terpenuhi, maka nilai asumsi d_n benar
Jika tidak terpenuhi, maka asumsikan nilai d_n lain dan ulangi langkah nomor 3 dan seterusnya.
5. Jika nilai d_n telah diperoleh, hitung momen yang berhubungan dengan pilihan awal ε_{oi} menggunakan persamaan (3.27)



CONTOH SOAL
ANALISIS PENAMPANG KONDISI ELASTIS DAN BETON RETAK

Contoh soal analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak



Example 3.4

The cross-section analysed in [Example 3.3](#) and shown in [Figure 3.7](#) is to be re-analysed to determine its post-cracking behaviour. It is assumed that the duct has been grouted, thereby bonding the tendon to the surrounding concrete. The force in the prestressing steel at the time of application of the external moment is $P_e = 1200 \text{ kN}$. Material properties are as follows:

Contoh soal analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

$$E_c = 30 \times 10^3 \text{ MPa}; E_p = E_s = 200 \times 10^3 \text{ MPa};$$

$$f'_c = 40 \text{ MPa}; f_y = 400 \text{ MPa}; f_p = 1840 \text{ MPa}.$$

Sample calculations are provided for the particular applied moment that produces a top fibre stress $\sigma_o = -20$ MPa, as shown in [Figure 3.11](#).

When $\sigma_{oi} = -20$ MPa, the instantaneous top fibre strain is

$$\epsilon_{oi} = \frac{\sigma_{oi}}{E_c} = -667 \times 10^{-6}$$

Contoh soal analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

The area of the transformed cross-section prior to cracking and the second moment of area about the centroidal axis are $A=261 \times 10^3 \text{ mm}^2$ and $I=14760 \times 10^6 \text{ mm}^4$, respectively. The various strain components in the prestressing steel are obtained from Equations 3.31–3.33:

$$\epsilon_{pe} = \frac{1200 \times 10^3}{1000 \times 200\,000} = 6000 \times 10^{-6}; \quad \epsilon_{pt} = \frac{667 \times 10^{-6}(600 - d_n)}{d_n};$$

$$\epsilon_{ce} = \frac{1}{30 \times 10^3} \left(-\frac{1200 \times 10^3}{261 \times 10^3} - \frac{1200 \times 10^3 \times 189^2}{14760 \times 10^6} \right) = -250 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_{pe} = \frac{P_e}{A_p E_p} \quad \text{Eq. (3.31)}$$

$$\epsilon_{ce} = \frac{1}{E_c} \left(-\frac{P_e}{A} - \frac{P_e e^2}{I} \right) \quad \text{Eq. (3.32)}$$

$$\epsilon_{pt} = \frac{-\epsilon_{oi}(d_p - d_n)}{d_n} \quad \text{Eq. (3.33)}$$

Contoh soal analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

$$T_p = E_p A_p \left(\epsilon_{pe} + |\epsilon_{ce}| + \frac{-\epsilon_{oi}(d_p - d_n)}{d_n} \right)$$

and from Equation 3.35,

$$(+)= (+) \quad [(+) + (+) + \{-(-)\}]$$

$$T_p = 200 \times 10^3 \times 1000 \left[6000 + 250 + \frac{667(600 - d_n)}{d_n} \right] \times 10^{-6}$$

Similarly from Equations 3.29 and 3.30:

$$T_s = \sigma_{s2} A_{s2} = \epsilon_{s2} E_s A_{s2} = E_s A_{s2} \frac{-\epsilon_{oi}(d_{s2} - d_n)}{d_n}$$

$$(+)= \quad \quad \quad -(-)$$

$$T_s = 200\,000 \times 1800 \times \frac{667(740 - d_n)}{d_n} \times 10^{-6} = \frac{240 \times 10^3 (740 - d_n)}{d_n}$$

and

$$C_s = \sigma_{s1} A_{s1} = \epsilon_{s1} E_s A_{s1} = E_s A_{s1} \frac{\epsilon_{oi}(d_n - d_{s1})}{d_n}$$

$$(-)=$$

$$(-)$$

$$C_s = 200\,000 \times 900 \times \frac{-667(d_n - 60)}{d_n} = \frac{-120 \times 10^3 (d_n - 60)}{d_n}$$

The compression in the concrete above the neutral axis is obtained from Equation 3.28:

$$C = \frac{1}{2} \sigma_{oi} b d_n = \frac{1}{2} E_c \epsilon_{oi} b d_n \quad C = \frac{1}{2} \times -20 \times 300 \times d_n = -3000 d_n$$

$$(-) = (-) = (-)$$

Contoh soal analisis tegangan kondisi elastis

Kondisi beton retak

Trial values of d_n are considered below:

d_n (mm)	T_p (kN)	T_s (kN)	ΣT (kN)	C (kN)	C_s (kN)	ΣC (kN)	$\Sigma T + \Sigma C$ (kN)
460	1291	146	1437	1380	104	1484	-47
440	1299	164	1463	1320	104	1424	+39
FROM LINEAR INTERPOLATION							
449	1295	155	1450	1347	104	1451	-1
CLOSE ENOUGH							

With $d_n=449$ mm when $\varepsilon_{oi}=-667 \times 10^{-6}$, the moment and curvature on the section are obtained from Equations 3.27 and 3.36, respectively.

$$M = (1295 \times 0.6) + (155 \times 0.74) - \left(1347 \times \frac{0.449}{3} \right) - (104 \times 0.06)$$

$$= 684 \text{ kNm}$$

TUGAS ke-1

Berdasarkan data pada Gambar 3.11 dan data lainnya pada Example 3.4, buatlah:

- perhitungan
- susun tabel seperti pada halaman 36 untuk membuktikan bahwa $d_n = 449 \text{ mm}$

Tugas dikumpulkan di website e-learning 1 minggu sejak diberikan.

Format nama file tugas dalam format *.pdf.:

I_A_NIM_Nama.pdf (Indralaya, kelas A, NIM, nama)

I_B_NIM_Nama.pdf (Indralaya, kelas B, NIM, nama)

P_A_NIM_Nama.pdf (Palembang, kelas A, NIM, nama)

P_B_NIM_Nama.pdf (Palembang, kelas B, NIM, nama)

Referensi

- ACI Committee 374, (2005): *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary* (ACI 374.1-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 318, (2019): *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-14) *and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), (2000): *Federal Emergency Management Agency (FEMA) 356 Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, Virginia, pp. 3-19 to 3-20.
- Badan Standardisasi Nasional, (2012): 7833-2012 *Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung*, Jakarta.
- Delitriana, Arvila, webinar Salam Berbagi #2: Perencanaan Jembatan/Jalan Layang yang Dapat Mengakomodir Pembangunan Sistem Transportasi di Darat, Institut Teknologi Bandung.
- Duan, L., Chen, K., Tan, A. "Prestressed Concrete Bridges.", *Bridge Engineering Handbook*, Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan, Boca Raton: CRC Press, 2000.
- Gibert, R.I. dan Mickleborough, N.C., (2005): *Design of Prestressed Concrete*, Spon Press-Taylor and Francis Group, London and New York.
- Nawy, E.G., (2010): *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*, 5th edition, Prentice Hall, New Jersey.



TKS 422314

Struktur Beton Prategang

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Phones: 081373672011

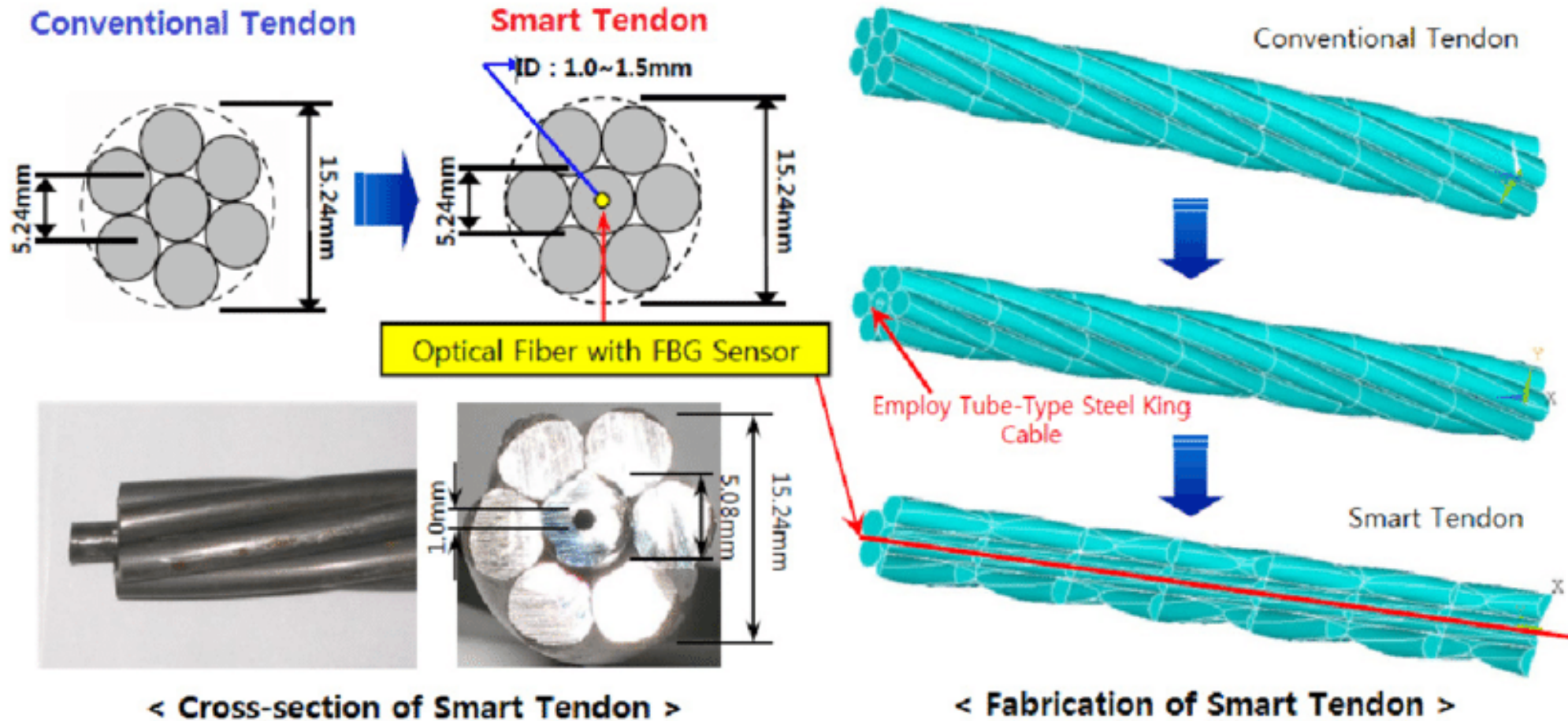
Available on: <http://bit.ly/S1UnsriBetonPrategang>



Tulangan pra-tegang Jembatan Musi IV



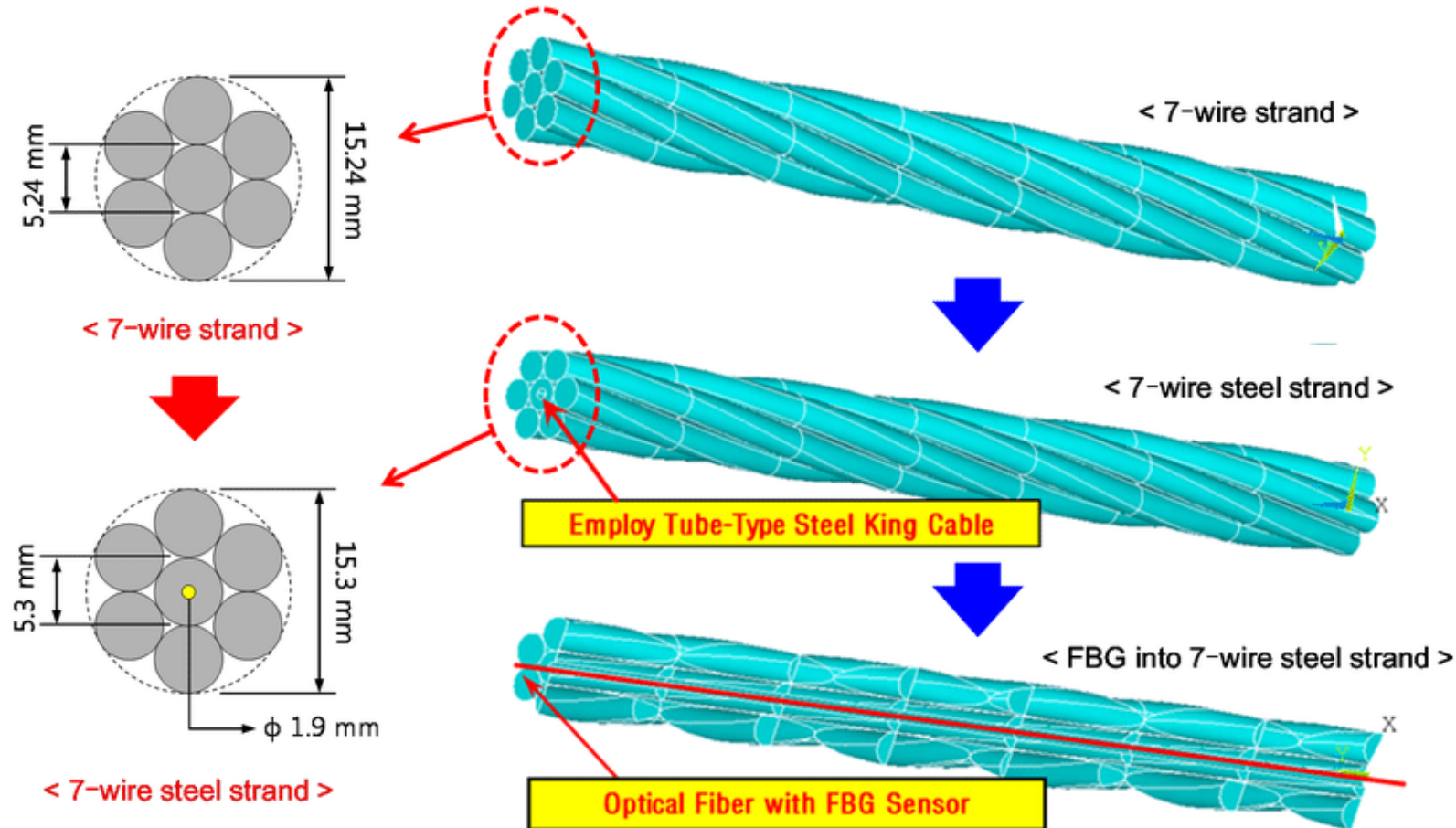
Material *strand* (*tendon*) pra-tegang



Fungsi *7-wire strand*: meningkatkan kinerja struktur dalam menahan beban momen lentur, mengurangi retak.
Fungsi *fiber Bragg grating* (FBG): untuk memantau kondisi kelayakan struktur (*structure health monitoring*).

Sumber: Kim, dkk. (2017)

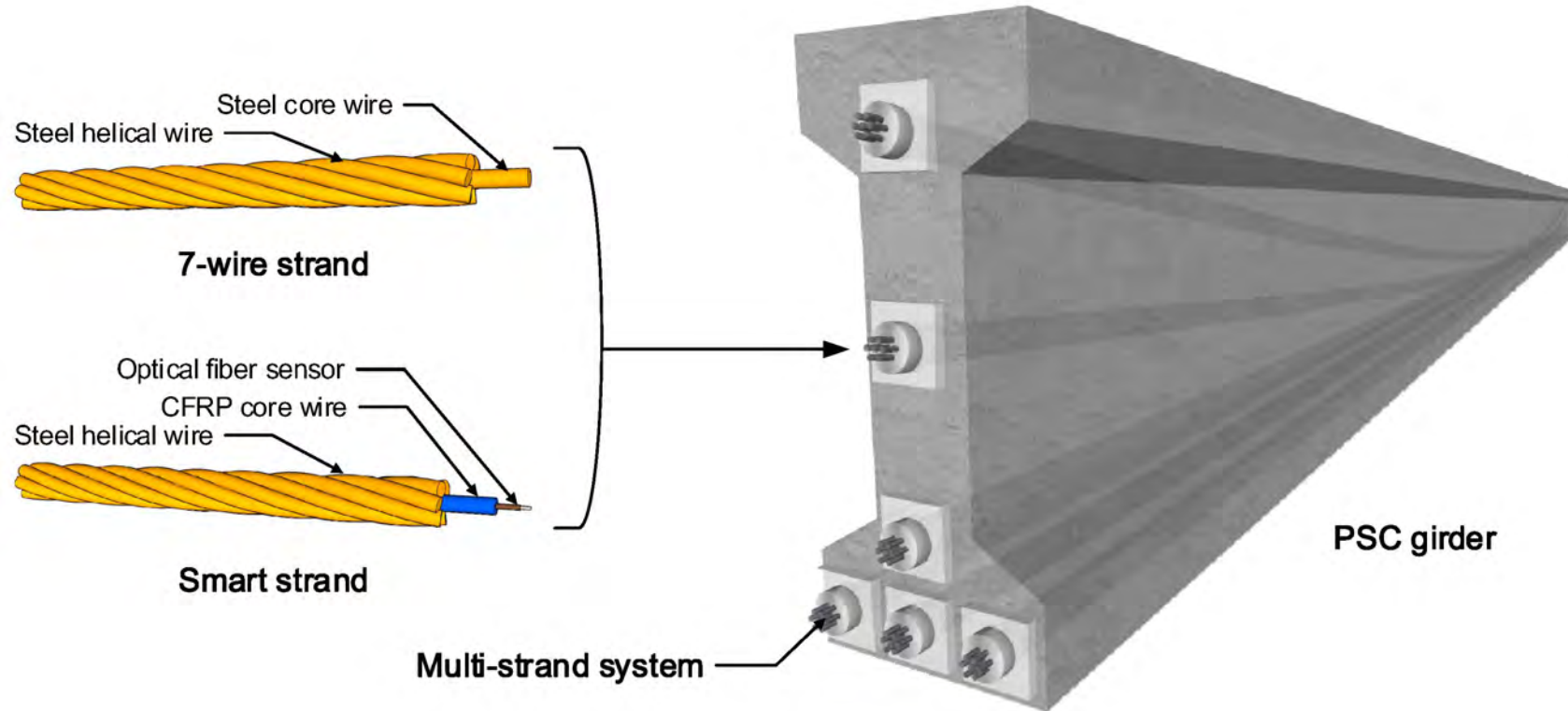
Material *strand* pra-tegang



Fungsi *7-wire strand*: meningkatkan kinerja struktur dalam menahan beban momen lentur, mengurangi retak. Peningkatan batas dan kinerja sensor *fiber Bragg grating* (FBG) yang menumpang pada *7-wire strand*.

Sumber: Kim, dkk. (2017)

Material *strand* pra-tegang



Sumber: Cho, dkk. (2016)

Material *strand* pra-tegang

7-wire strand

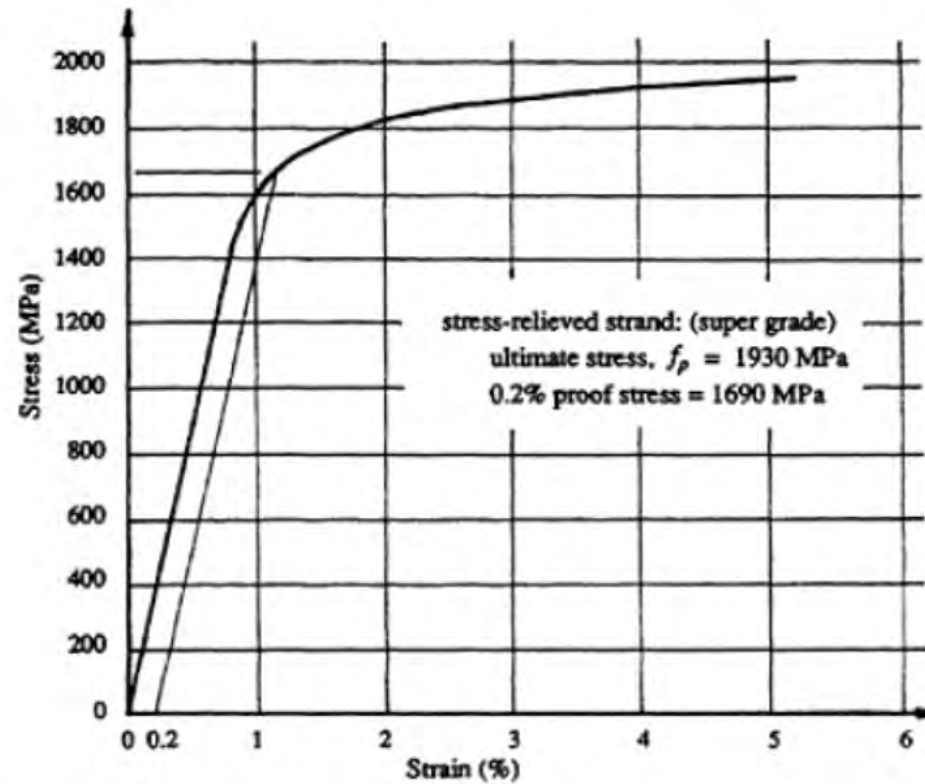


Figure 2.13 Typical stress-strain curve for 7-wire strand.

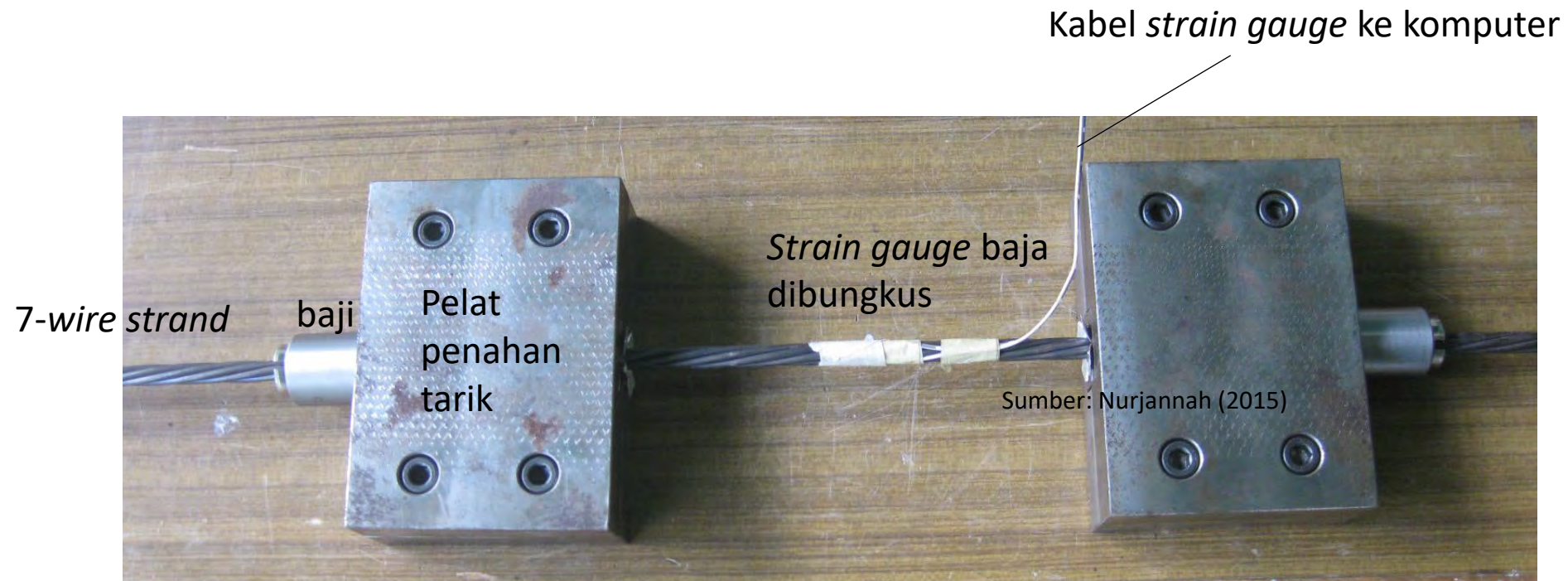
Sumber: Gilbert & Mickleborough (2005)

Baji (*wedge*)



Sumber: Henan prestressing equipment on <https://china-prestressing.en.made-in-china.com>

Strand dan baji



Uji tarik 7-wire Strand



Tipe angkur



Angkur VSL hidup tipe CS 2000

Tipe angkur ini ringan dan kompak. Pelat bantalan (*bearing plate*) terbuat dari besi cor dan mortar berkekuatan tinggi dan dilengkapi dengan “terompet” plastik. Pengangkurannya ringan dan mudah dipasang. Penguat zona lokal dapat dibentuk oleh tulangan spiral atau ortogonal, atau kombinasi keduanya. Angkur CS 2000 dapat digunakan juga sebagai angkur tanpa tegangan di ujung (*non-tensioned – dead-end anchor*).



Angkur VSL hidup tipe GC

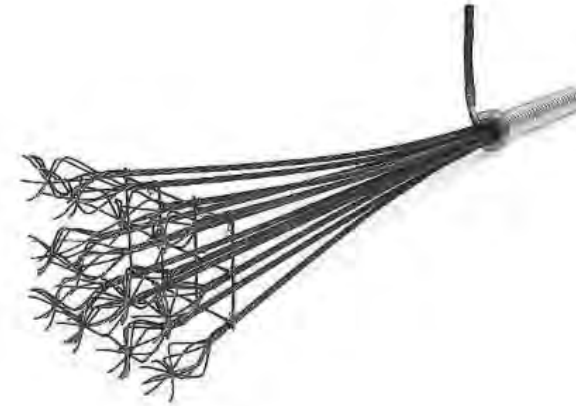
Angkur jenis ini memungkinkan transmisi gaya prategang yang cepat ke struktur melalui angkur besi cor sayap (*flange*) tunggal. Ini adalah angkur yang kompak dan relatif ringan. Tulangan zona lokal dibentuk oleh tulangan spiral dan ortogonal. Angkur tipe GC dapat digunakan juga sebagai angkur tanpa tegangan di ujung (*non-tensioned – dead-end anchor*).

Tipe angkur



Angkur VSL hidup tipe E

Gaya prategang ditransmisikan secara merata melalui pelat angkur baja ke beton. Tulangan zona lokal dapat dibentuk oleh tulangan spiral atau ortogonal, atau kombinasi keduanya. Setelah modifikasi kecil, angkur tipe E dapat digunakan sebagai angkur tanpa tegangan di ujung (*non-tensioned – dead-end anchor*).



Angkur VSL ujung mati tipe H

Angkur ujung mati ini menghadirkan solusi teknis yang mudah dan ekonomis untuk transmisi gaya prategang ke struktur. Dengan mempertimbangkan bahwa gaya prategang dimasukkan melalui ikatan antara tulangan dan beton di sekitarnya, transmisi gaya menjadi sangat merata. Tegangan cincin-O menghilangkan gaya transversal di akar angkur. Jaringan tulangan di area ujung berfungsi sebagai grid ruang untuk *strand/tendon* tunggal. Jenis angkur ini juga digunakan untuk *strand/tendon* pada saluran datar.

Tipe angkur



Angkur VSL ujung mati tipe U

Dengan angkur jenis ini, transmisi gaya prategang diwujudkan sebagian melalui ikatan antara *strand* prategang dan beton di sekitarnya, dan sebagian melalui pelat-lempeng-U. Tegangan cincin-O dan spiral menghilangkan gaya transversal di akar angkur. Pengankuran ini dapat dipasang ke struktur baik secara horizontal maupun vertikal. Jika jumlah *strand* di jangkar ganjil, maka *strand* ganjil diputar di sekitar pelat-U dan dimasukkan kembali ke saluran. Karena ada kebutuhan alat khusus untuk menekuk *strand*, maka angkur jenis ini perlu dibuat sebelum ditempatkan ke dalam struktur.



Angkur VSL ujung mati tipe P

Jenis angkur ini digunakan di lokasi gaya prategang harus ditransfer ke struktur dalam jarak sesingkat mungkin dari ujung saluran tendon, atau di mana masing-masing keseluruhan gaya harus dimasukkan ke ujung elemen pasca-tegang (*post-tensioned*). Angkur terdiri dari pelat angkur melengkung, yang *strand*-nya daingkurkan menggunakan alat kelengkapan penekan. *Strand* dikunci dalam posisi yang diperlukan menggunakan pelat jarak. Angkur jenis ini digunakan juga untuk tendon pada saluran datar.

Zona pengangukuran tendon pasca tarik

Berdasarkan prinsip Saint-Venant, ekstensi zona pengangukuran dapat diperkirakan mendekati dimensi terbesar penampang.

Zona lokal dan zona umum ditunjukkan dalam Gambar R6.13.1 (a).

Jika alat angkut yang ditempatkan jauh dari ujung komponen ditarik, tegangan tarik besar terjadi secara lokal di belakang dan di depan alat angkut.

Tegangan tarik ini ditimbulkan oleh inkompatibilitas deformasi di depan dan belakang alat angkut (seperti diperlihatkan dalam Gambar R6.13.1 (b)).

Keseluruhan daerah terarsir harus dipertimbangkan, seperti terlihat dalam Gambar R6.13.1 (b).



(b) Daerah global untuk perangkat angkut yang ditempatkan jauh dari ujung komponen struktur

Gambar R6.13.1 - Zona pengangukuran

Zona pengangukuran tendon pasca Tarik

Zona lokal

Dari pasal R6.13.2

Zona lokal memikul **tegangan lokal** yang sangat tinggi yang ditimbulkan **alat angkut**, dan menyalurkannya ke zona lainnya.

Gaya prategang terfaktor:

$$P_{pu} = 1,2 P_{ijin}$$

Menimbulkan *overstress* sebesar:

$$0,94f_{py} \leq 0,80f_{pu}$$

sehingga

$$P_{pu} = (1,2) \underbrace{(0,80)f_{pu}A_{ps}}_{P_{ijin}} = 0,96f_{pu}A_{ps}$$

dengan:

A_{ps} : luas tulangan pra-tegang dalam daerah tarik (mm²)

f_{pu} : kekuatan Tarik baja pra-tegang yang disyaratkan (MPa)

P_{ijin} : gaya pra-tegang yang diijinkan (N)

P_{pu} : gaya pra-tegang terfaktor dalam perangkat angkut (N)

Zona pengangkur tendon pasca Tarik

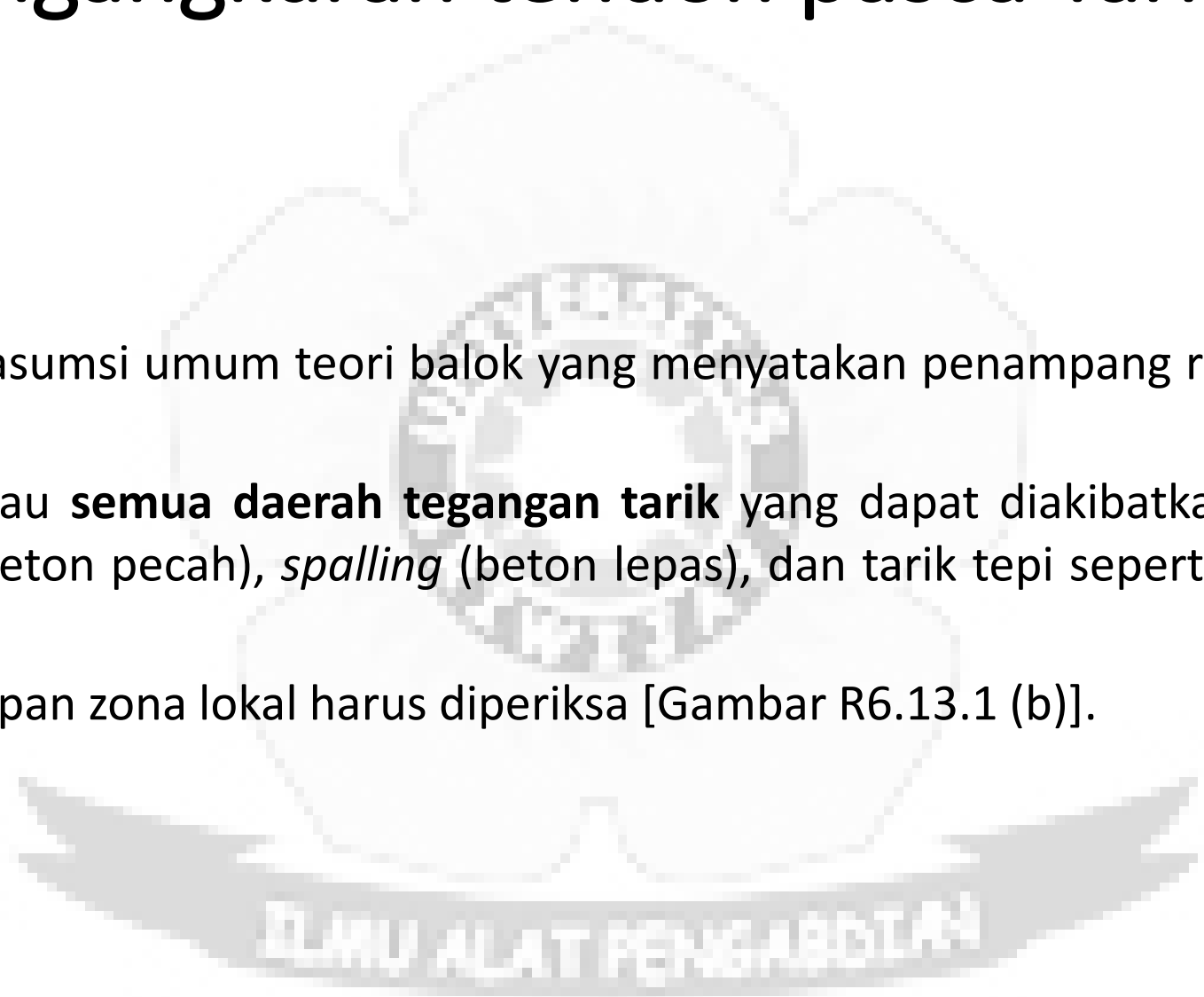
Zona umum

Dari pasal R6.13.3

Dalam **zona umum**, asumsi umum teori balok yang menyatakan penampang rata tetap rata, **tidak berlaku**.

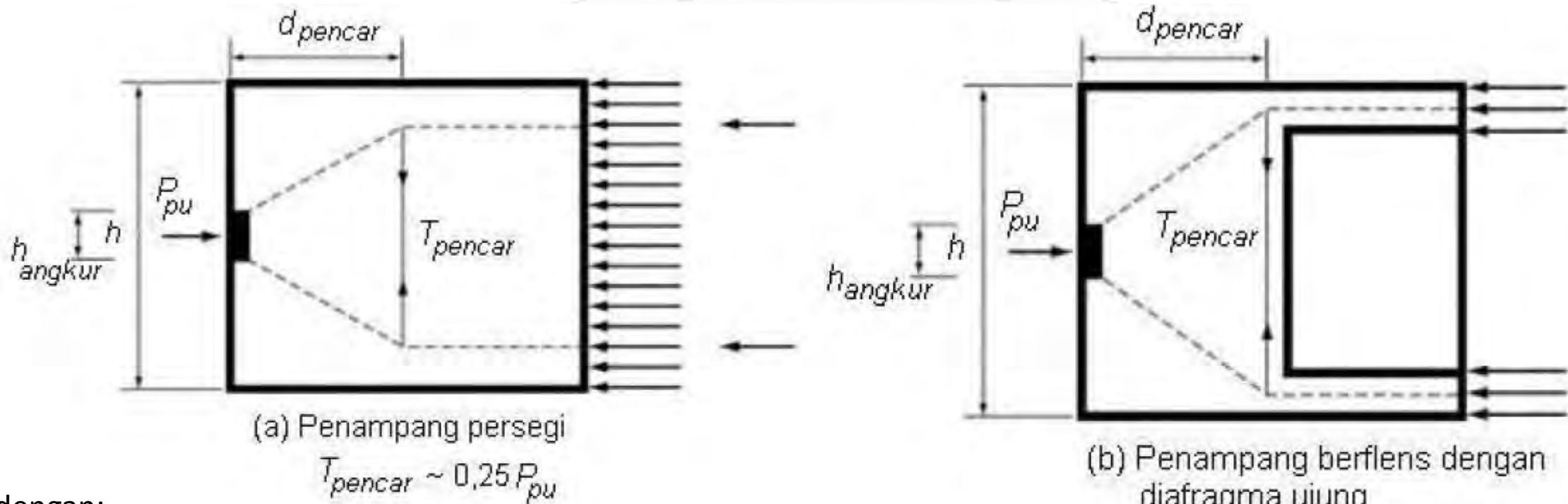
Desain harus meninjau **semua daerah tegangan tarik** yang dapat diakibatkan oleh alat angkut, termasuk *bursting* (beton pecah), *spalling* (beton lepas), dan tarik tepi seperti ditunjukkan dalam Gambar R6.13.1 (a).

Tegangan tekan di depan zona lokal harus diperiksa [Gambar R6.13.1 (b)].



Zona pengangkur tendon pasca tarik

Perubahan gaya yang tiba-tiba dalam penampang dapat menimbulkan deviasi yang nyata dalam alur gaya. **Deviasi** ini dapat **meningkatkan gaya tarik** seperti terlihat dalam Gambar R6.13.3.



dengan:

h : tinggi komponen struktur (penampang balok; mm)

P_{pu} : gaya pra-tegang terfaktor dalam perangkat angkur (N)

Gambar R6.13.3 - Pengaruh dari perubahan penampang melintang

Zona pengangkur tendon pasca tarik

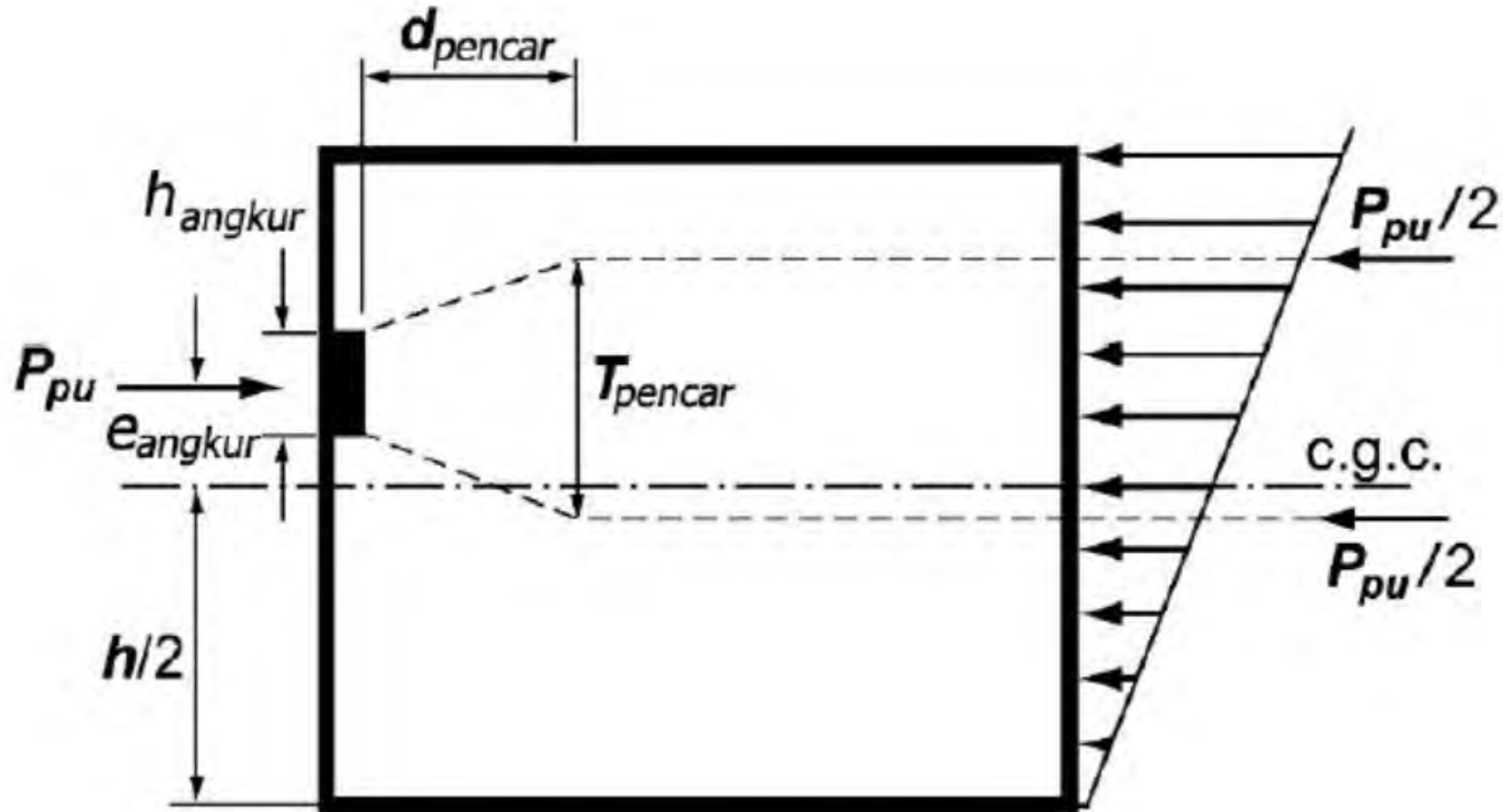
$$T_{pencar} = 0,25 \sum P_{pu} \left(1 - \frac{h_{angkur}}{h}\right) \quad (R14)$$

$$d_{pencar} = 0,50 (h - 2e_{angkur}) \quad (R15)$$

di mana $\sum P_{pu}$ adalah jumlah gaya-gaya prategang dari N tendon individual, h_{angkur} tinggi alat ankur atau group tunggal alat yang diletakkan berdekatan di arah yang ditinjau, mm, e_{angkur} eksentrisitas (selalu diambil positif dari alat ankur atau group tunggal yang diletakkan berdekatan terhadap titik pusat penampang, mm, dan h dimensi penampang di arah yang ditinjau, mm.

ILMU ALAT PENGANGKUR

Zona pengangkur tendon pasca tarik



Gambar R6.13.5 - Contoh model penunjang dan pengikat (strut-and-tie model)

Referensi

- ACI Committee 318, (2014): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional, (2012): 7833-2012 *Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung*, Jakarta.
- Cho, K., Cho, J.R., Kim, S.T., Park, S.Y., Kim, Y.J., dan Park, Y.H., (2016): Estimation of Prestress Force Distribution in Multi-Strand System of Prestressed Concrete Structures Using Filed Data Measured by Electromagnetic Sensor, *Sensors*, 16(8), 1317.
- Gibert, R.I. dan Mickleborough, N.C., (2005): *Design of Prestressed Concrete*, Spon Press-Taylor and Francis Group, London and New York.
- Kim, J.M., Kim, C.M., Choi, S.Y., dan Lee, B.Y., (2017): Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands, *Sensors*, 17, 1654.
- Nawy, E.G., (2010): *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*, 5th edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Nurjannah, S.A. (2015): dokumentasi disertasi.
- Henan prestressing equipment on <https://china-prestressing.en.made-in-china.com/product/oXLQBvvKfmUS/China-Cnm-Post-Tension-Accessories-Prestressing-Wedges.html>, diunduh tanggal 25 Maret 2019.
- <http://en.vsl.cz/post-tensioning/2-anchorage/>, diunduh tanggal 25 Maret 2019.



TKS 422314

Struktur Beton Prategang

Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

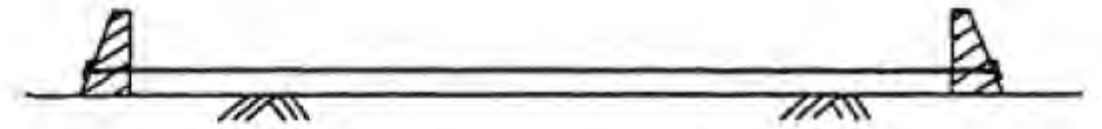
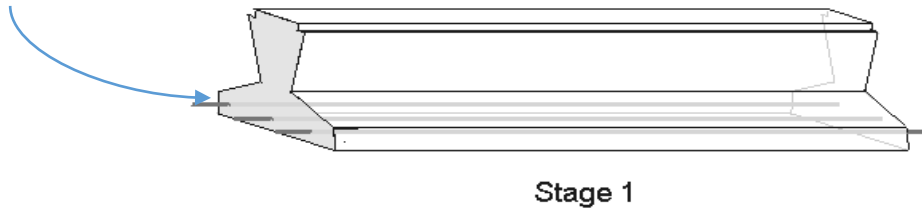
Available on: <http://bit.ly/S1UnsriBetonPrategang>

Metode Prategang (*Pre-stressing*)

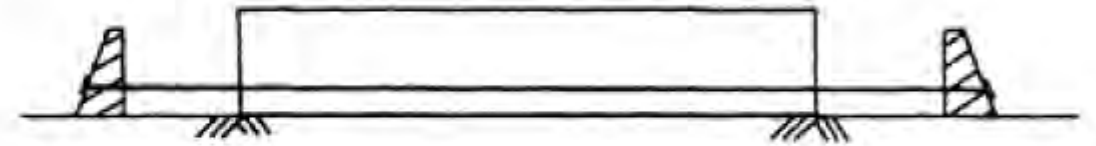
- **Pre-tensioning** adalah metode *pre-stressing* dengan cara **tendon** ditarik sebelum beton ditempatkan, dan gaya pre-stressed ditransfer ke beton saat kekuatan beton tercapai (sesuai umur beton).
- **Post-tensioning** metode *pre-stressing* dengan cara **tendon** ditarik setelah saat kekuatan beton tercapai (sesuai umur beton). Tendon segera diangkurkan pada beton yang mengeras sesudah *pre-stressing*.
- Istilah “kabel” digunakan untuk menyatakan resultan kumpulan tendon individual.

Pre-tensioning Method

tendon (kabel prategang)



(a) Tendons stressed between abutments



(b) Concrete cast and cured



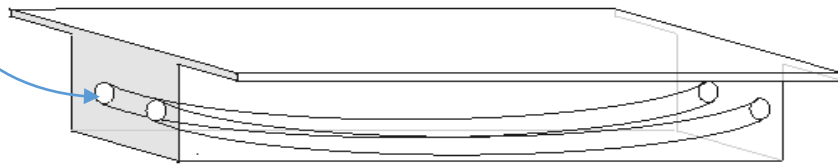
(c) Tendons released and prestress transferred

Figure 1.2 Pretensioning procedure. (Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3	Tahap 4
Tendon dan baja tulangan diletakkan di dalam bekisting balok.	Tendon ditarik sampai sekitar 70% kekuatan <i>ultimate</i> .	Beton dicor ke dalam cetakan balok dan dirawat sehingga mencapai kekuatan awal yang diperlukan.	Jika beton sudah dirawat, gaya tarik (dari mesin) pada tendon dilepas dan tendon terangkur sendiri di dalam beton.

Post-tensioning Method

Cable duct (selongsong)



Tahap 1	Tahap 2
Cable duct (selongsong) diletakkan dalam bekisting balok. Umumnya duct dipasang melengkung dan posisi ujungnya lebih tinggi untuk mengurangi eksentrisitas gaya prategang.	Beton dicor ke dalam bekisting dan dirawat sehingga mencapai kekuatan awal.
Tahap 3	Tahap 4
Tendon dimasukkan ke cable duct dan ditarik sampai sekitar 70% kekuatan ultimate.	Wedges dimasukkan ke ujung ankur dan gaya tarik tendon (dari mesin penarik) dilepas. Bahan grout dipompakan ke dalam duct untuk melindungi tendon.

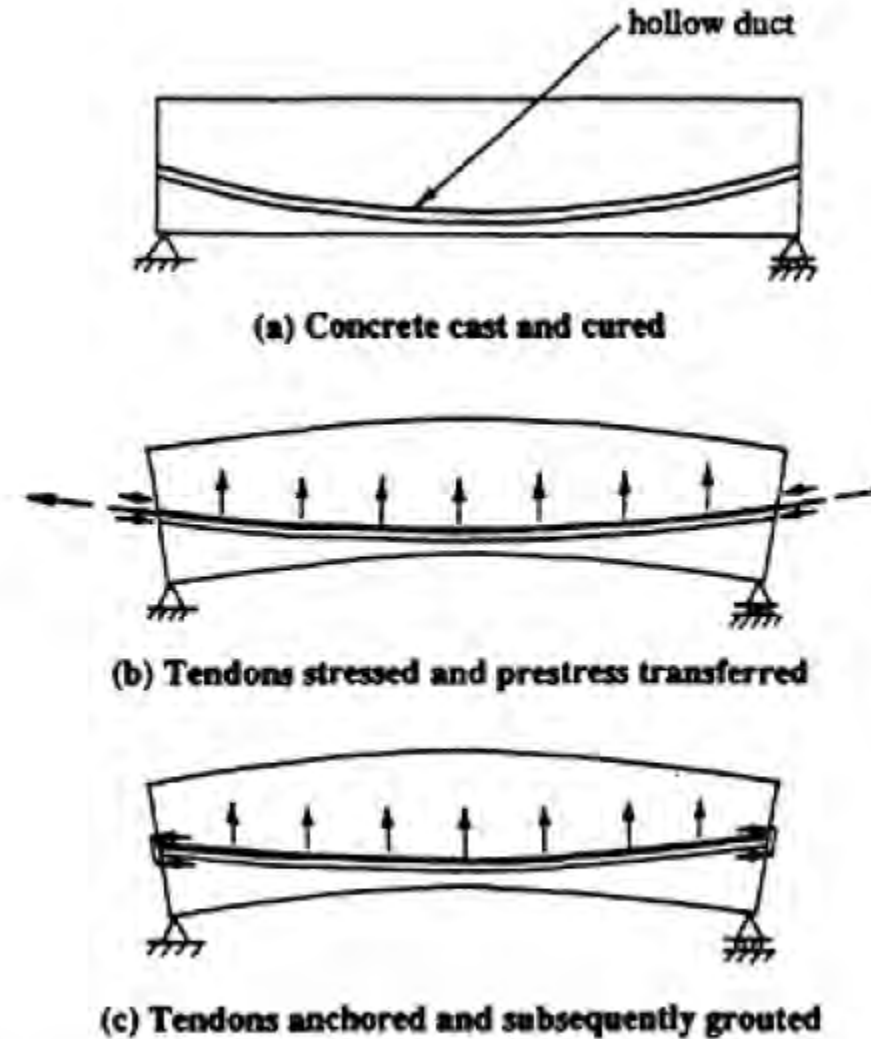


Figure 1.3 Post-tensioning procedure.

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Proses penarikan *strand* prategang

Penahan



Sumber: Nurjannah, 2016

Pengontrol alat *stressing*



Sumber: Nurjannah, 2016

Alat manometer. Jarum penunjuk gaya *stressing* dalam satuan **bar**



Sumber: Nurjannah, 2016

Proses *stressing*

Penarik *strand* partegang

Metode: *pretensioned*, yaitu *stressing* dahulu, lalu beton dicor.

Sumber: Nurjannah, 2016

Proses penarikan *strand* prategang

- Gaya *stressing* yang terlihat pada alat kontrol adalah dalam **satuan bar**. Penentuan nilai gaya *stressing* adalah berdasarkan luas penampang *strand* pra-tegang. Nilai gaya tersebut dikonversikan dengan Tabel Gaya *Stressing* dan Satuan Bar yang dikeluarkan oleh pihak pengkalibrasi alat *stressing*, sehingga nilai gaya *stressing* yang diaplikasikan adalah **78% dari f_{pu}** ; untuk satu *strand* pra-tegang D12,7 mm adalah **228 bar**.

TABEL GAYA PENARIKAN AWAL DAN AKHIR
 PRODUK TP KOTAK, CCSP & BALOK JEMBATAN JALUR VI
 (DENGAN SINGLE STRESSING)

A. MATERIAL (JIS G 3536)

JENIS PC	DIAMETER (mm)	AS (mm ²)	TENSILE LOAD (Kg)
PC Strand	Ø 9,53	54,84	10400
PC Strand	Ø 11,1	74,19	14100
PC Strand	Ø 12,7	90,71	18700
PC Strand	Ø 15,2	138,7	26900

B. ALAT SINGLE STRESSING

MERK	MIBA
No. KALIBRASI	HSG-H11
No. INVENT	
KAPASITAS	25 TONS
LUAAS PISTON	62,63 CM ²

C. BESAR PENARIKAN AWAL 40% UTS

JENIS PC	DIAMETER (mm)	JUMLAH STRAND	PEMBACAAN MANOMETER			KETERANGAN
			KG	BAR	BAR DIPAKAI	
PC Strand	Ø 9,53	1	4100	65,14	65	
	Ø 11,1	1	5640	88,31	88	
	Ø 12,7	1	7480	117,13	117	
	Ø 15,2	1	10640	166,61	167	

D. BESAR PENARIKAN AKHIR 70% UTS

JENIS PC	DIAMETER (mm)	JUMLAH STRAND	PEMBACAAN MANOMETER			KETERANGAN
			KG	BAR	BAR DIPAKAI	
PC Strand	Ø 9,53	1	7290	113,99	114	
	Ø 11,1	1	9870	154,55	155	
	Ø 12,7	1	13080	204,97	205	
	Ø 15,2	1	18620	291,56	292	

E. BESAR PENARIKAN AKHIR 75% UTS

JENIS PC	DIAMETER (mm)	JUMLAH STRAND	PEMBACAAN MANOMETER			KETERANGAN
			KG	BAR	BAR DIPAKAI	
PC Strand	Ø 9,53	1	7800	122,14	122	
	Ø 11,1	1	10575	165,59	166	
	Ø 12,7	1	14025	219,61	220	
	Ø 15,2	1	19950	312,39	312	

F. BESAR PENARIKAN AKHIR 78% UTS

JENIS PC	DIAMETER (mm)	JUMLAH STRAND	PEMBACAAN MANOMETER			KETERANGAN
			KG	BAR	BAR DIPAKAI	
PC Strand	Ø 9,53	1	8112	127,02	127	
	Ø 11,1	1	10998	172,21	172	
	Ø 12,7	1	14586	228,40	228	
	Ø 15,2	1	20748	324,69	325	

Keterangan: Berdasarkan Kalibrasi tanggal

7-Mar-15

Tabel *stressing* sebagai acuan gaya tarik penggunaan alat penarik *strand*/kabel prategang. Dari produsen alat manometer.

Gaya *stressing* dan satuan bar



SPECIFICATIONS FOR PC STRAND

ASTM A416 - SEVEN-WIRE UNCOATED LOW RELAXATION STRAND							
Grade	Nominal Strand Diameter in [mm]	Strand Tolerance in [mm]	Minimum Breaking Strength Lbs [kgs]	Min. Yield Strength at 1% Extension Lbs [kgs]	Minimum Elongation at 24" Gauge	Nominal Area In ² [mm ²]	Nominal Weight Lbs/1000 ft Kg/1000 m
250K	3/8" [9.5]	0.3910/0.3590 [9.93/9.13]	20,000 [9,072]	18,000 [8,165]	3.5%	0.080 [51.61]	272 [405]
	7/16" [11.1]	0.4535/0.4215 [11.51/10.71]	27,000 [12,247]	24,300 [11,022]		0.108 [69.68]	367 [548]
	1/2" [12.7]	0.5160/0.4840 [13.1/12.3]	36,000 [16,329]	32,400 [14,696]		0.144 [92.9]	490 [730]
270K	3/8" [9.5]	0.4010/0.3690 [10.18/9.38]	23,000 [10,433]	20,700 [9,389]	3.5%	0.085 [55.03]	290 [432]
	7/16" [11.1]	0.4635/0.4315 [11.76/10.96]	31,000 [14,061]	27,900 [12,655]		0.115 [74.19]	390 [582]
	1/2" [12.7]	0.5260/0.4940 [13.35/12.55]	41,300 [18,733]	37,170 [16,860]		0.153 [98.71]	520 [775]
	0.52" (1/2"HBS) [13.2]	0.5460/0.5140 [13.86/13.06]	45,000 [20,412]	40,500 [18,368]		0.165 [106.45]	563 [874]
	9/16" [14.3]	0.5885/0.5565 [14.94/14.14]	51,700 [23,451]	46,530 [21,102]		0.192 [123.87]	650 [967]
	0.6" [15.2]	0.6260/0.5940 [15.89/15.09]	58,600 [26,581]	52,740 [23,922]		0.217 [140.00]	740 [1,102]

Brosur *strand* prategang



Strand diameter [mm]

Minimum breaking Strength [kgs]

Minimum breaking Yield [kgs]

Area [mm²]

RELAXATION PROPERTIES	
Initial Stress	Maximum Relaxation after 1000 Hours
70% G.U.T.S.	2.5%
80% G.U.T.S.	3.5%

270K	3/8" [9.5]	0.4010/0.3690 [10.18/9.38]	23,000 [10,433]	20,700 [9,389]	3.5%	0.085 [55.03]	290 [432]
	7/16" [11.1]	0.4635/0.4315 [11.76/10.96]	31,000 [14,061]	27,900 [12,655]		0.115 [74.19]	390 [582]
	1/2" [12.7]	0.5260/0.4940 [13.35/12.55]	41,300 [18,733]	37,170 [16,860]		0.153 [98.71]	520 [775]
	0.52" (1/2"HBS) [13.2]	0.5460/0.5140 [13.86/13.06]	45,000 [20,412]	40,500 [18,368]		0.165 [106.45]	563 [874]
	9/16" [14.3]	0.5885/0.5565 [14.94/14.14]	51,700 [23,451]	46,530 [21,102]		0.192 [123.87]	650 [967]
	0.6" [15.2]	0.6260/0.5940 [15.89/15.09]	58,600 [26,581]	52,740 [23,922]		0.217 [140.00]	740 [1,102]

SUMIDEN WIRE PRODUCTS CORPORATION

East Coast Manufacturing: 710 Marshall Stuart Drive • Dickson, TN 37055 • 615-446-3199
West Coast Manufacturing: 1412 El Pinal Drive • Stockton, CA 95205 • 209-466-8924
PC Sales Customer Service: • East Toll Free 866-491-5020 • West Toll Free 866-246-3758

Rev. 2
Page 1 of 1

Data dari produsen *strand*

Untuk *strand* berdiameter 12,7 mm

Data dari brosur produsen *strand* (harus memenuhi syarat sesuai peraturan):

Minimum breaking strength : 18.733 kgs = 187.330 N (dari brosur)

Luas 7-wire *strand* : $A_{p\ 1\ strand} = 98,71\ mm^2$ (dari brosur)

Tegangan *ultimate* : $f_{pu, brosur} = \frac{\text{Minimum breaking strength}}{A_{p\ 1\ strand}} = \frac{187330}{98,71}$
 $= 1897,78\ MPa > f_{pu, teori} = 1860\ MPa$ (dari *text book*)
 $= 270.000\ psi$

Minimum breaking yield : 16.860 kgs = 168.600 N (dari brosur)

Tegangan leleh : $f_{py, brosur} = \frac{\text{Minimum breaking yield}}{A_{p\ 1\ strand}} = \frac{168600}{98,71}$
 $= 1708,03\ MPa$

Sumber: Nurjannah, 2016

Gaya *stressing*

Untuk *strand* berdiameter 12,7 mm

Tegangan *ultimate* : $f_{pu, teori} = 1860 \text{ MPa}$

Tegangan saat *stressing/jacking* : $f_{pj, teori} = 0,75f_{pu, teori} = 1395 \text{ MPa}$

Gaya leleh : $F_{py} = 168.600 \text{ N}$ (brosur produsen *strand*)

Gaya *ultimate* : $F_{pu} = 187.330 \text{ N}$ (brosur produsen *strand*)

Tegangan *stressing* atau *jacking* : $f_{pj} = 0,75f_{pu} = 1,087f_{pi} = 1,087 \times 0,69f_{pu}$

Tegangan *immediate* : $f_{pi} = 0,92f_{pj}$

Gaya *stressing*

Untuk *strand* berdiameter 12,7 mm (lanjutan)

Luas 7-wire *strand* : $A_{p\ 1\ strand} = 98,71\ mm^2$
(dari brosur produsen *strand* = tabel gaya *stressing*)

Perbandingan gaya *stressing* atau *jacking*

Gaya *stressing* atau *jacking* (teori) : $F_{pj} = A_p f_{pj} = A_{p\ 1\ strand} \times 0,75 f_{pu} = 98,71 \times 0,75 \times 1860$
 $= 137.700,45\ N$ per *strand* (teori, dengan $f_{pu} = 1860\ MPa$)

Gaya *stressing* atau *jacking* (teori & brosur): $F_{pj} = 0,75 F_{pu} = 0,75 \times 187.330 = 140.497,50\ N$ per *strand*
(F_{pu} dari brosur produsen *strand*)

Gaya *stressing* atau *jacking* (tabel manometer) : $F_{pj} = 14.580\ kgs = 145.860,00\ N$ per *strand*
(= 228 *bar* dari tabel gaya *stressing* yang dipraktekkan)

F. BESAR PENARIKAN AKHIR 78% UTS

JENIS PC	DIAMETER (mm)	JUMLAH STRAND	PEMBACAAN MANOMETER		
			KG	BAR	BAR DIPAKAI
PC Strand	Ø 9.53	1	8112	127.02	127
	Ø 11.1	1	10998	172.21	172
	Ø 12.7	1	14580	228.40	228
	Ø 15.2	1	20748	324.68	325

Tabel *stressing* sebagai acuan gaya tarik penggunaan alat penarik *strand*/kabel prategang. Dari produsen alat manometer.

Gaya *stressing*

Untuk *strand* berdiameter 12,7 mm (lanjutan)

Seharusnya:

$$\begin{aligned} \text{Gaya } \textit{stressing} \text{ atau } \textit{jacking} : F_{pj} &= 145.860,00 \times \frac{A_{p, 1 \textit{ strand, brosur (hlm. 8)}}}{A_{p, 1 \textit{ strand, tabel } \textit{stressing} (hlm. 7 \& 11)}} \\ &= 145.860,00 \times \frac{98,71}{98,71} \\ &= 145.860,00 \text{ N per } \textit{strand} \\ &= 228 \textit{ bar} \text{ (dari tabel gaya } \textit{stressing} \text{ yang dipraktekkan)} \end{aligned}$$

Maka 78% UTS yang dipilih sebagai acuan proses *stressing* karena paling mendekati nilai F_{pj} teori.

UTS: *Ultimate tension stress*.

Proses *releasing strand* prategang

- ***Releasing*** (pemutusan *stressing* secara perlahan-lahan) saat umur beton 28 hari (atau kurang, bila kekuatan tekan beton sudah cukup) adalah sedikit di atas gaya *releasing*, yaitu sekitar **250 bar** untuk *strand* pra-tegang D12,7 mm. Hal ini dilakukan agar ***bar wedges terlepas***, kemudian *strand* pra-tegang dapat dipotong.

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Penyebab hilangnya gaya prategang:

- Proses *stressing* atau *jacking* (gaya: P_j) selesai, sehingga alat penarik dilepas dari *tendon* atau *strand* prategang (gaya: P_i)  *immediate loss*

$$\text{Gaya immediate loss} = P_j - P_i$$

- Perpendekan beton (*elastic shortening*)
- Rangkak (*creep*): deformasi akibat beban konstan
- Penyusutan (*shrinkage*) beton: akibat perubahan suhu
- Relaksasi baja

Time-dependent loss
(kehilangan akibat pengaruh waktu)

Gaya pada *tendon* atau *strand* yang tersisa: gaya efektif, P_e

$$P_i \quad \xrightarrow{\hspace{1cm}} \quad P_e$$

Time-dependent loss

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

$$D_{strand} = 12,7 \text{ mm (= 0,5 inchi)}$$

$$A_{p \text{ 1 strand}} = 98,71 \text{ mm}^2 \text{ (dari brosur)}$$

$$E_p = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$$

Strand yang dipakai sesuai dengan ASTM A416/A416M-06 (2006), yaitu *7-wire uncoated low relaxation 270k* ($f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$) dengan data luas (A_p), *minimum breaking strength*, dan *minimum breaking yield* sesuai dengan data dari produsen *strand*.

$$f_{pu} = \text{Minimum breaking strength} / A_{p \text{ 1 strand}} = 187.330 \text{ N} / 98,71 \text{ mm}^2 = 1897,78 \text{ MPa}$$

$$f_{py} = \text{Minimum breaking yield} / A_{p \text{ 1 strand}} = 168.600 \text{ N} / 98,71 \text{ mm}^2 = 1708,03 \text{ MPa}$$

Tegangan saat *strand* ditarik diambil sebesar:

$$f_{pj} = 1400 \text{ MPa (standar untuk tipe 7-wire uncoated low relaxation 270k dan } f_{pu} = 1860 \text{ MPa)}$$

$$E_p = 200.000 \text{ MPa (standar)}$$

$$E_c = 40.627,88 \text{ MPa (contoh; diketahui dari hasil pengujian silinder Reactive Powder Concrete)}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Tegangan yang ditransfer dari *strand* ke beton:

$$\begin{aligned}f_{pi} &= 0,92 f_{pj} = 1288 \text{ MPa} \\ &= 0,69 f_{pu}; f_{pu} = 1860 \text{ MPa (teori)} \\ &\leq 0,70 f_{pu} \text{ (PCI Committee, 1975)}\end{aligned}$$

$$f_{pe} = 0,85 f_{pi} = 1094,8 \text{ MPa}$$

Nilai f_{pe} digunakan untuk menghitung momen nominal penampang balok.

Diketahui: jumlah *strand* pada balok = 1

Gaya total yang terjadi saat *strand* ditarik:

$$F_{pj} = f_{pj} \times (A_{p \ 1 \ strand} \times \text{jumlah strand}) = 1400 \times (98,71 \times 1) = 138,194 \text{ kN}$$

Gaya pada setiap *strand* saat ditarik:

$$F_{pj \ per \ strand} = F_{pj} / \text{jumlah strand} = 138,194 / 1 = 138,194 \text{ kN}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Perpendekan Beton (Elastic Shortening)

(Sumber: Lin dan Burns, 1991)

Asumsi: $f_{ci} = f'_c$ (t = 28 hari), maka $E_{ci} = E_c$

$$n = \frac{E_p}{E_c} = \frac{200000}{40627,88} = 4,923$$

Massa jenis beton bertulang: $W_G = 2400 \text{ kg/m}^3 = 2,4 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^3$

Dimensi penampang balok: $b = 300 \text{ mm}$, $h = 350 \text{ mm}$. Panjang balok: $L = 4000 \text{ mm}$. Jarak *strand* prategang ke c.g.c.: $e = h/2 = 175 \text{ mm}$

Momen akibat berat sendiri balok beton bertulang:

$$\begin{aligned} M_G &= \left(\frac{1}{8}\right) W_G (bh) L^2 \\ &= (1/8) (2,4 \times 10^{-5}) (300 \times 350) (4000)^2 = 5.040.000 \text{ N.mm} = 5040 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

$$I = (1/12) b h^3 = (1/12) (300) (350)^3 = 1.071.875.000 \text{ mm}^4$$

Sumber: Nurjannah, 2016

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Perpendekan Beton (*Elastic Shortening*), lanjutan

$$K_{cir} = 0,90 \text{ [Sumber: Lin dan Burns, 1995, eq. 4-4]}$$

$$f_{cir} = K_{cir} \left[\frac{F_{pj}}{bh} + \frac{F_{pj} e^2}{I} - \frac{M_G e}{I} \right]$$

$$f_{cir} = 0,9 \left[\frac{138194}{(300 \times 350)} + \frac{138194 \times 175^2}{1.071.875.000} - \frac{5.040.000 \times 175}{1.071.875.000} \right] = 3,998 \text{ MPa}$$

$$K_{es} = 1 \text{ (sistem } \textit{pretension}) \text{ dan } K_{es} = 0,5 \text{ (sistem } \textit{post-tension}) \text{ [Sumber: Lin dan Burns, 1995, eq. 4-6]}$$

Diketahui: pemasangan *strand* prategang dengan cara *pretension*.

Kehilangan tegangan akibat perpendekan beton (*elastic shortening*):

$$ES = K_{es} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cir}$$

$$ES = (1) \frac{200.000}{40.627,88} (3,998) = 19,679 \text{ MPa}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Rangkak (*Creep*)

(Sumber: Lin dan Burns, 1991)

Tegangan akibat beban mati:

Misalkan beban mati : $w_s = 200 \frac{kg}{m^2} = 2 \times 10^{-3} \frac{N}{mm^2}$

Bentang balok : $L = 4000 \text{ mm}$

Jarak strand ke c.g.c : $e = \frac{h}{2} = 175 \text{ mm}$

$$f_{c ds} = \frac{M_{DL} e}{I} = \frac{\frac{1}{8} w_s L^2 e}{I} = \frac{\frac{1}{8} (2 \times 10^{-3}) (4000)^2 (175)}{1.071.875.000} = 6,531 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

Untuk *pretension*: $K_{CR} = 2$ dan *post-tension* $K_{CR} = 1,6$ [Sumber: Lin dan Burns, 1995, eq. 4-7]

Kehilangan tegangan akibat rangkakan (*creep*):

$$CR = K_{CR} \frac{E_p}{E_c} (f_{cir} - f_{c ds})$$

$$CR = (2) \frac{200.000}{40.627,88} (3,998 - 6,531 \times 10^{-4}) = 39,351 \text{ MPa}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Susut (Shrinkage)

(Sumber: Comité Euro-International du Béton, 1993)

Relative Humidity (RH); kelembaban relatif lingkungan = 84 % (data dari thermometer)

$$A_c = bh = 300 \times 350 = 105000 \text{ mm}^2 \text{ (luas penampang balok)}$$

$$u = 2b + 2h = 2(300) + 2(350) = 1300 \text{ mm (keliling penampang balok)}$$

$$H = 2A_c/u = 2(105.000)/1300 = 161,538 \text{ mm}$$

$$h_o = 100 \text{ mm (default)}$$

$$t = 60 \text{ hari (umur beton saat pengujian)}$$

$$t_s = 28 \text{ hari (umur beton saat susut mulai ditinjau)}$$

$$t_1 = 1 \text{ hari (default)}$$

Sumber: Nurjannah, 2016

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Susut (Shrinkage), lanjutan

Pada $t = 60$ hari (umur beton saat pengujian):

$$\beta_s = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350 \left(\frac{H}{h_0}\right)^2 + \frac{(t - t_s)}{t_1}} \right]^{0,5} \text{ koefisien yang menggambarkan perkembangan susut terhadap waktu}$$

$$\beta_s = \left[\frac{(60 - 28)/1}{350 \left(\frac{161,538}{100}\right)^2 + \frac{(60 - 28)}{1}} \right]^{0,5} = 0,183987$$

f_{cm} : kuat tekan beton rata-rata umur 28 hari (MPa); $f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$

Diketahui dari hasil pengujian kuat tekan silinder *Reactive Powder Concrete*:

$f_{cm} = 120 - 140$ MPa (saat $t=28$ hari). Ambil $f_{cm} = 120$ MPa.

$f_{cm0} = 10$ MPa (default)

$RH_0 = 100\%$ (default)

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Susut (Shrinkage), lanjutan

$$\beta_{SRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 = 1 - \left(\frac{84}{100}\right)^3 = 0,407$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \beta_{SRH} = -0,631$$

β_{SC} adalah koefisien yang bergantung pada tipe semen.

$\beta_{SC} = 4$ (semen *slowly hardening*); 5 (semen normal); 8 (semen *rapid hardening high strength*)

Diketahui: semen normal, maka $\beta_{SC} = 5$

$$\varepsilon_S = \left[160 + 10 \beta_{SC} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_S = \left[160 + 10 (5) \left(9 - \frac{120}{10} \right) \right] \times 10^{-6} = 1 \times 10^{-5}$$

Notional shrinkage coefficient:

$$\varepsilon_{CS0} = [\varepsilon_S f_{cm}] \beta_{RH}$$

$$\varepsilon_{CS0} = [1 \times 10^{-5} \times 120] (-0,631) = -7,572 \times 10^{-4}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Susut (Shrinkage), lanjutan

Regangan susut:

$$\varepsilon_{CS} = \varepsilon_{CS0} \times \beta_s$$

$$\varepsilon_{CS} = -7,572 \times 10^{-4} \times 0,183987 = -1,394 \times 10^{-4}$$

$$K_{SH} = 1 \text{ (untuk } \textit{pretension}); K_{SH} = 0,8 \text{ (untuk } \textit{post-tension})$$

Diketahui, metode penarikan *strand* prategang adalah *pretension*, maka $K_{SH} = 1$

Kehilangan tegangan akibat susut:

$$SH = K_{SH} |\varepsilon_{CS}| E_p$$

$$SH = 1 |-1,394 \times 10^{-4}| 200000 = 27,877 \text{ MPa}$$

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Kehilangan Tegangan Akibat Relaksasi Baja

(Sumber: Lin dan Burns, 1991)

Kehilangan tegangan pra-tegang akibat relaksasi:

$$RE = [K_{re} - J (ES + CR + SH)] C$$

Untuk *low-relaxation strand* dengan $f_{pu} = 1860$ MPa, maka $K_{re} = 35$ dan $J = 0,040$ (Tabel 4-5, Lin dan Burns, 1991, hlm. 27).

Karena $\frac{f_{pi}}{f_{pu}} = 0,69$, maka $C = 0,70$ (Tabel 4-6, Lin dan Burns, 1991; hlm. 28).

$$RE = [35 - 0,040 (19,679 + 39,351 + 27,877)] 0,70 = 22,067 \text{ MPa}$$

Sumber: Nurjannah, 2016

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Total Kehilangan Tegangan Pra-tegang

(Sumber: Lin dan Burns, 1991)

Kehilangan tegangan pra-tegang total (*total loss*):

$$\begin{aligned} TL &= ES + CR + SH + RE \\ &= 19,679 + 39,351 + 27,877 + 22,067 \\ &= 108,973 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan prategang efektif yang masih ada adalah tegangan partegang awal (*initial*) – total loss:

$$\begin{aligned} f_{pe}^* &= f_{pi} - TL \\ &= 1288 - 108,973 \\ &= 1179,027 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Menurut teori (*text book*), $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$, maka $\frac{f_{pe}^*}{f_{pu}} = \frac{1179,027}{1860} = 0,634$

Sumber: Nurjannah, 2016

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

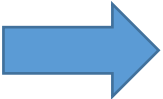
Table 4-5 Values of K_{rr} and J

Type of tendon ^a	K_{rr}	J
270 Grade stress-relieved strand or wire	20,000	0.15
250 Grade stress-relieved strand or wire	18,500	0.14
240 or 235 Grade stress-relieved wire	17,600	0.13
270 Grade low-relaxation strand	5,000	0.040
250 Grade low-relaxation wire	4,630	0.037
240 or 235 Grade low-relaxation wire	4,400	0.035
145 or 160 Grade stress-relieved bar	6,000	0.05

^aIn accordance with ASTM A416-74, ASTM A421-76, or ASTM A722-75.

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Tabel 4-5 Nilai K_{re} dan J

Tipe tendon ^a	K_{re} (MPa)	J
<i>Strand</i> atau kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1860 MPa	138	0,150
<i>Strand</i> atau kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1720 MPa	128	0,140
Kawat <i>stress-relieved</i> derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	121	0,130
 <i>Strand</i> relaksasi-rendah derajat 1860 MPa (f_{pu})	35	0,040
Kawat relaksasi-rendah derajat 1720 MPa	32	0,037
Kawat relaksasi-rendah derajat 1655 MPa atau 1620 MPa	30	0,035
Batang <i>stress-relieved</i> derajat 1000 MPa atau 1100 MPa	41	0,050

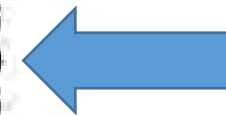
^aSesuai ASTM A416-74, A421-76, atau ASTM A722-75

Sumber: Lin dan Burns, 1991

Kehilangan (*loss*) gaya prategang

Table 4-6 Values of C

f_{pi}/f_{pu}	Stress relieved strand or wire	Stress-relieved bar or low-relaxation strand or wire
0.80		1.28
0.79		1.22
0.78		1.16
0.77		1.11
0.76		1.05
0.75	1.45	1.00
0.74	1.36	0.95
0.73	1.27	0.90
0.72	1.18	0.85
0.71	1.09	0.80
0.70	1.00	0.75
0.69	0.94	0.70
0.68	0.89	0.66
0.67	0.83	0.61
0.66	0.78	0.57
0.65	0.73	0.53
0.64	0.68	0.49
0.63	0.63	0.45
0.62	0.58	0.41
0.61	0.53	0.37
0.60	0.49	0.33



Referensi

- ACI Committee 318, (2019): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional, (2012): 7833-2012 *Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung*, Jakarta.
- Comité Euro-International du Béton, (1993): CEB FIB Model Code 1990, Chapter 2.1.6.4, Thomas Telford Services, London.
- Gibert, R.I. dan Mickleborough, N.C., (2005): *Design of Prestressed Concrete*, Spon Press-Taylor and Francis Group, London and New York.
- Lin, T. Y. dan Burns, H., (1991): *Desain Struktur Beton Prategang*, Ed. 3, pp. 80-109. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Lin, T. Y. dan Burns, H., (1995): *Design of Prestressed Concrete Structures*, 3rd ed, John Wiley & Sons, New York.
- Mehta, P. K. dan Monteiro, P. J. M., (2006): *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd edition, Mc-Graw Hill, USA.
- Nurjannah, S.A., (2016): *Perilaku Histeretik Sub-assembly Balok-Kolom Reactive Powder Concrete Pra-tegang Parsial*, Disertasi Program Studi Doktor Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Precast Concrete Institute (PCI) Committee (1975): Recommendations for Estimating Prestressed Losses, *Journal of Precast/Prestressed Concrete Institute*, Vol. 20, No. 4, July-August, pp. 43-75.



TKS 422314

Struktur Beton Prategang

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Available on: <http://bit.ly/S1UnsriBetonPrategang>

Gaya transfer akibat tendon yang dibungkus

Gaya P dibebankan pada elemen beton prategang di bagian angkur. Hal ini menyebabkan gaya transfer sepanjang kelengkungan tendon. Balok di atas dua tumpuan sederhana pada Figure 1.5a dibebani prategang dari kabel yang menekuk di tengah bentang. Eksentrisitas kabel adalah 0 di setiap ujung dan e di tengah bentang. Kemiringan dua bagian kabel adalah sebesar θ , dan karena nilai θ kecil, maka

$$\theta = \sin \theta = \tan \theta = \frac{e}{L/2} \quad (1.1)$$

Pada Figure 1.5b, gaya dari tendon menekan beton. Di tengah bentang, kabel memberikan gaya tekan R pada beton ke arah atas.

$$R = 2P \sin \theta = \frac{4Pe}{L} \quad (1.2)$$

Di setiap angkur, gaya horizontal $P \cos \theta$ ($\approx 2Pe/L$). Diagram momen diperlihatkan pada Figure 1.5c.

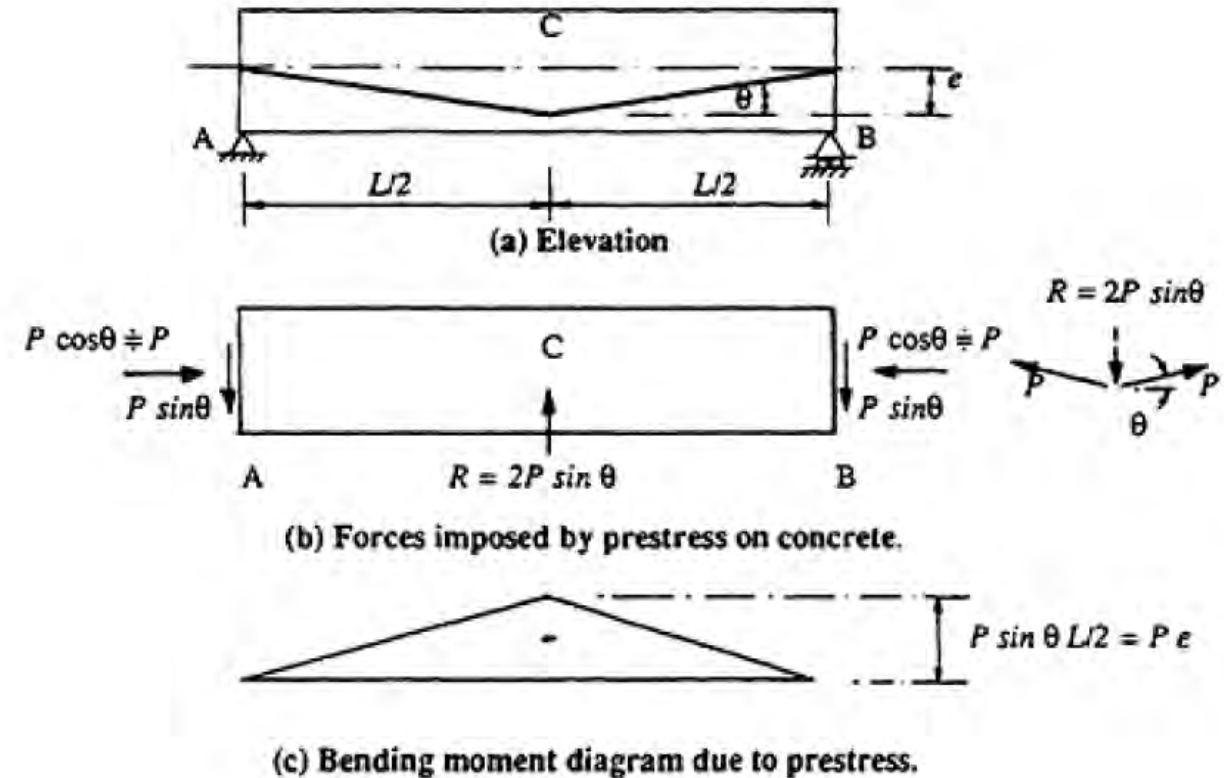


Figure 1.5 Beam with centrally depressed tendon. (Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Gaya transfer akibat tendon yang dibungkus

Jika kabel prategang berbentuk parabolik, maka kabel memberikan gaya tekan pada beton sepanjang kabel tersebut. Figure 1.6 memperlihatkan balok prategang dengan kabel parabolik. Bentuk kabel parabolik:

$$y = 4e \left[\frac{x}{L} - \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

Persamaan kemiringan:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4e}{L} \left[1 - \frac{2x}{L} \right] = \theta \quad (1.4)$$

Persamaan kelengkungan:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{8e}{L^2} = \varphi_p \quad (1.5)$$

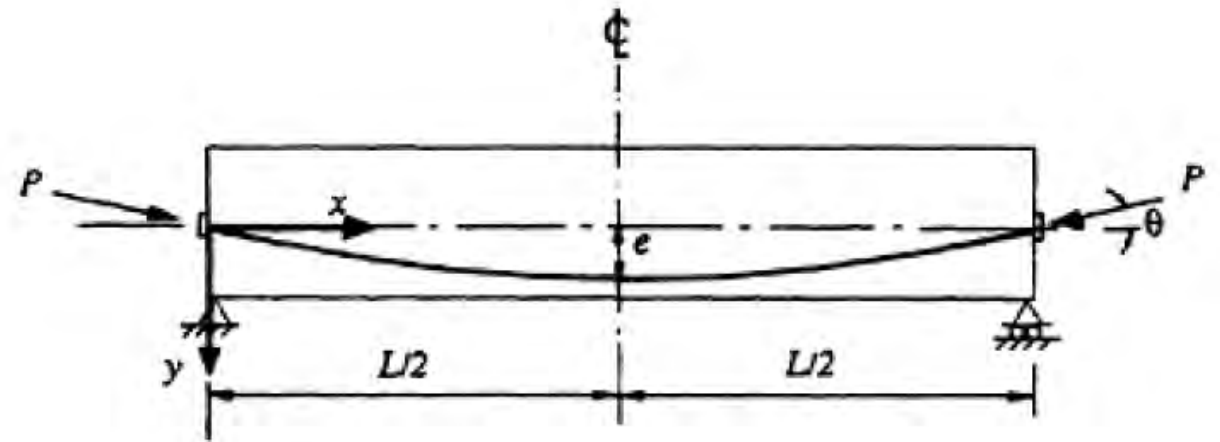


Figure 1.6 Simple beam with parabolic tendon profile.

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Gaya transfer akibat tendon yang dibungkus

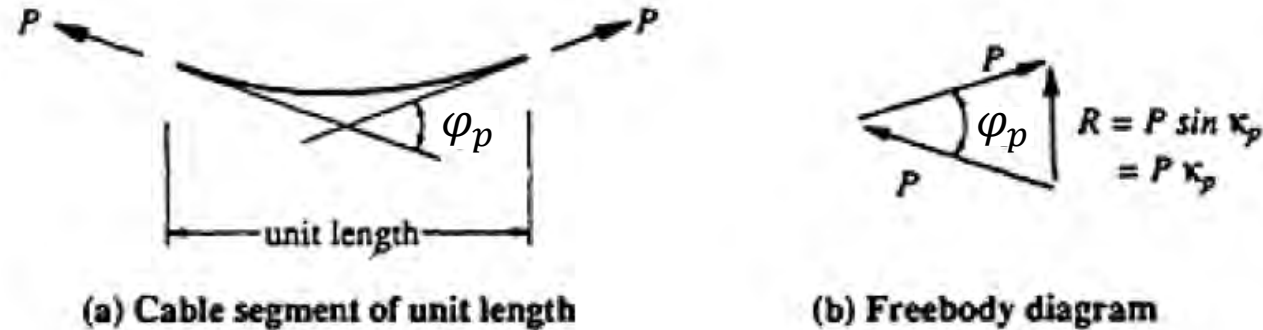


Figure 1.7 Forces on a curved cable of unit length.

Dari persamaan 1.4, kemiringan kabel di setiap angkur saat $x = 0$ dan $x = L$ adalah

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \pm \frac{4e}{L} \quad (1.6)$$

Gaya prategang horizontal di setiap angkur: P (lihat Figure 1.8)

Gaya prategang vertikal di setiap angkur: $4Pe/L$ (lihat Figure 1.8)

Figure 1.7b: kabel memberikan **gaya transfer merata ke arah atas** (w_p) per meter panjang. Untuk kabel parabolik dengan kelengkungan konstan (persamaan 1.5), maka

$$w_p = P\varphi_p = \frac{8Pe}{L^2} \quad (1.7)$$

Gaya transfer akibat tendon yang dibungkus

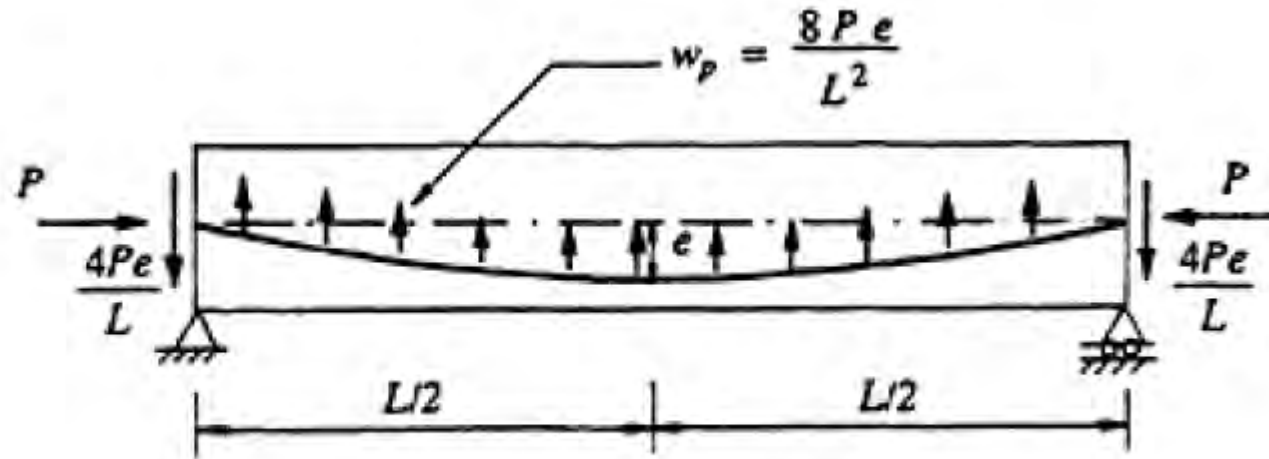


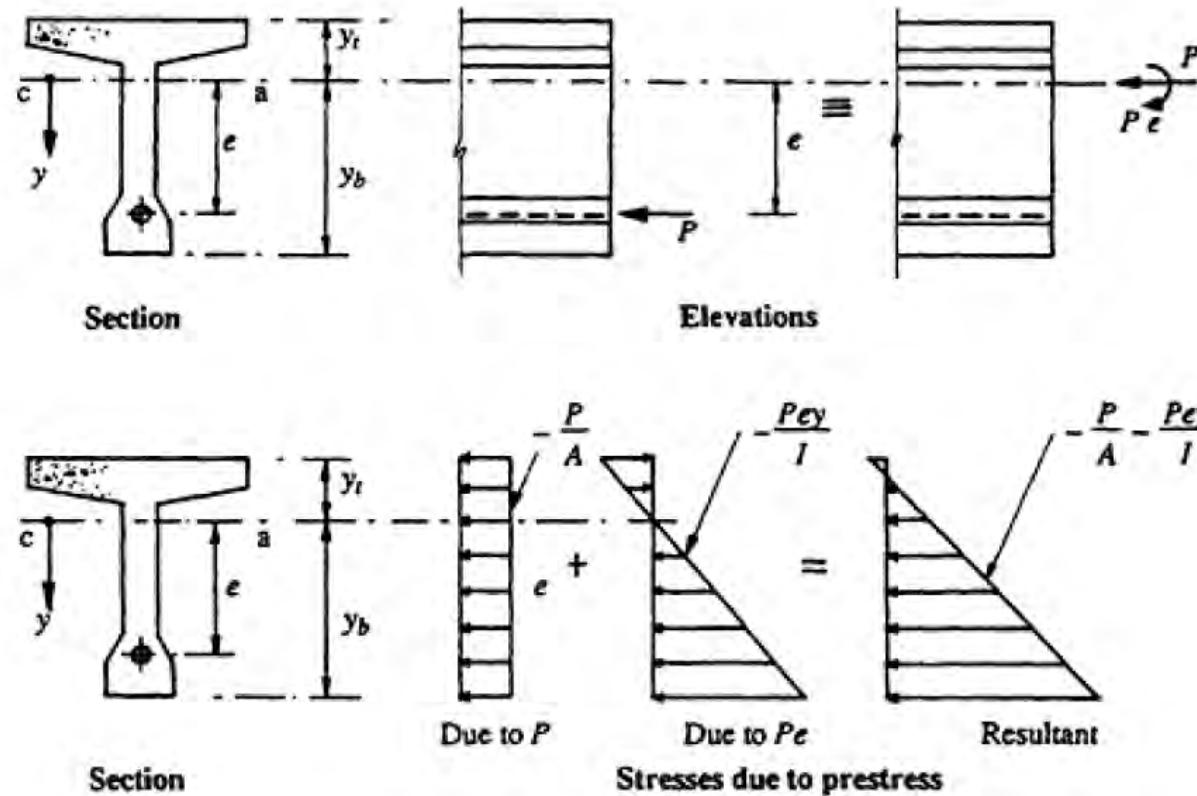
Figure 1.8 Forces exerted on a concrete beam by a parabolic tendon. (Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Sebuah balok yang mengalami gaya tekan dari kabel diperlihatkan pada Figure 1.8. Dengan eksentrisitas maksimum, persamaan 1.7 dapat digunakan untuk menghitung nilai gaya tekan P yang menyebabkan gaya merata w_p ke arah atas.

Di bawah gaya seimbang (*balanced load*), balok tidak melengkung dan hanya menahan beban tekan P . Ini prinsip kerja pendekatan desain *load balancing*.

Calculation of elastic stresses

Combined load approach



Resultan tegangan akibat gaya prategang P adalah:

$$\sigma = -\frac{P}{A} - \frac{Pe y}{I} \quad (1.8)$$

dengan

A : luas penampang

I : momen inersia

y : jarak dari sumbu tengah ke gaya P

Tegangan elastik akibat momen positif M pada penampang tidak retak:

$$\sigma = \frac{M y}{I} \quad (1.9)$$

Figure 1.9 Concrete stress resultants and stresses caused by prestress.

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Calculation of elastic stresses

Combined load approach

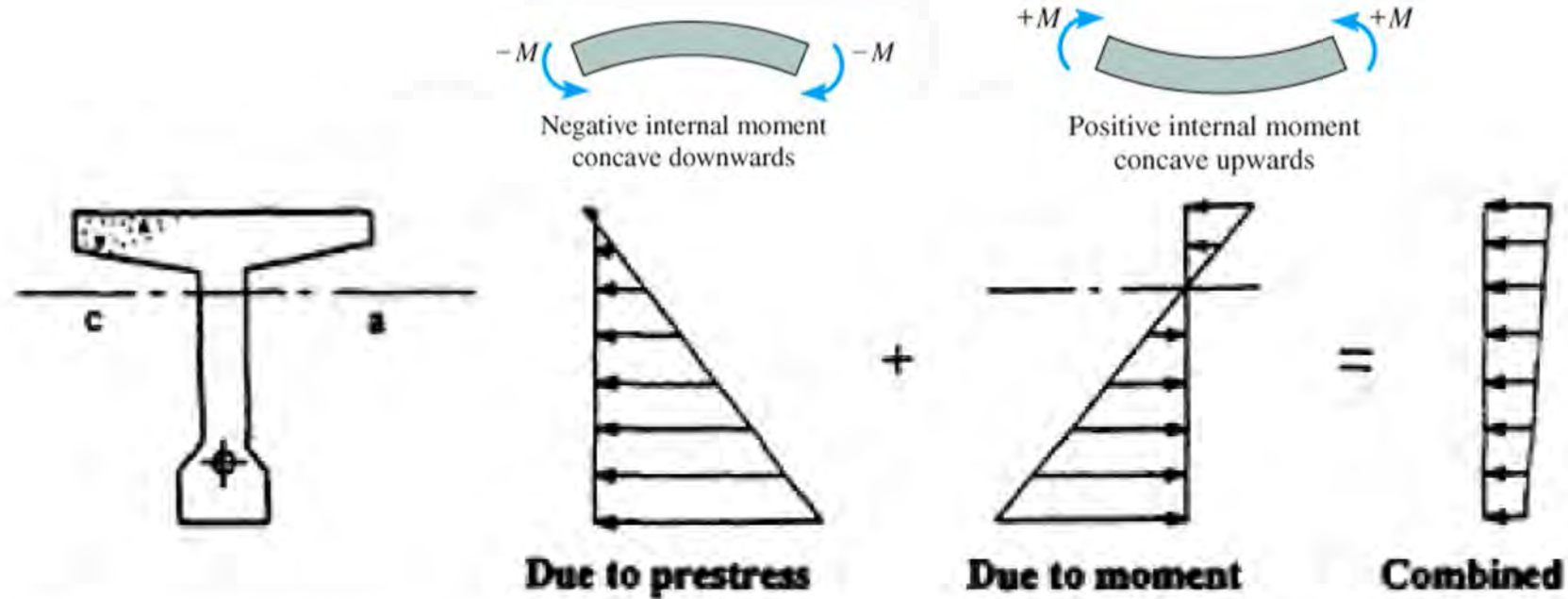


Figure 1.10 Combined stresses. (Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Distribusi kombinasi tegangan akibat prategang (Figure 1.10) adalah

$$\sigma = -\frac{P}{A} - \frac{Pey}{I} + \frac{My}{I} \quad (1.10)$$

Calculation of elastic stresses

Internal couple concept

Distribusi kombinasi tegangan (Figure 1.10) akibat gaya tekan P yang berlokasi sejauh l di atas tendon (*strand*) prategang diperlihatkan pada Figure 1.11. Gaya tekan P terhadap beton menghasilkan momen:

$$M = Pl \quad (1.11)$$

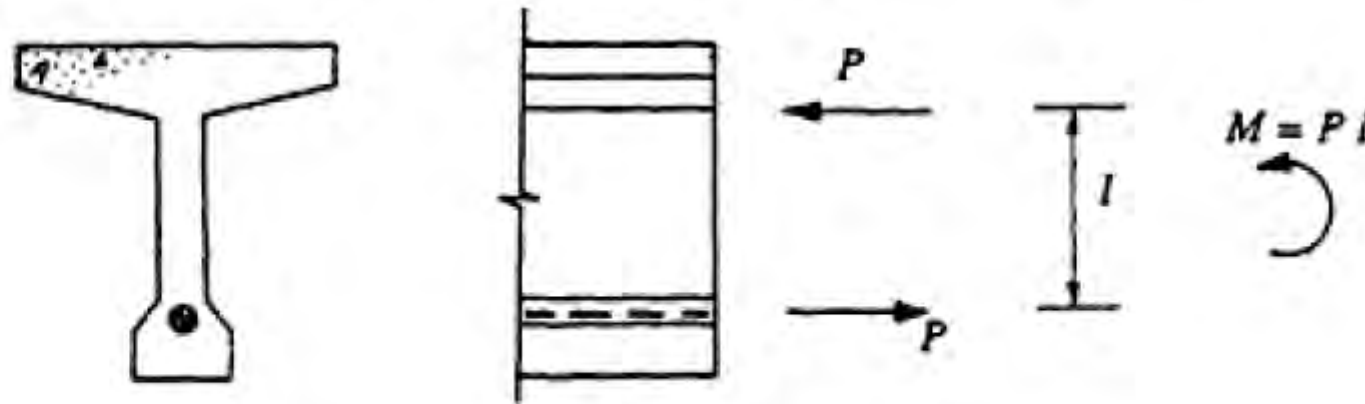


Figure 1.11 Internal couple. (Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Calculation of elastic stresses

Load balancing approach

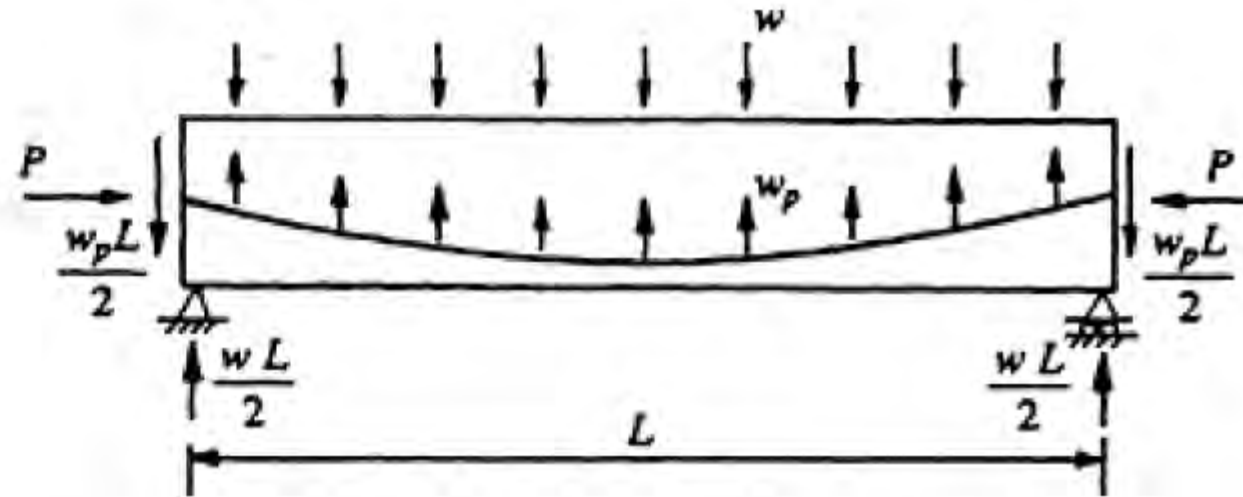


Figure 1.12 Forces imposed on a concrete beam with a parabolic tendon.

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

- ❖ Gaya merata transfer (persamaan 1.7) pada Figure 1.12 akibat berbagai macam beban, termasuk beban gravitasi eksternal (w).

Calculation of elastic stresses

Load balancing approach

- ❖ Jika $w = w_p$, maka momen lentur dan gaya geser yang disebabkan oleh beban gravitasi (w) diseimbangkan oleh beban merata akibat P (w_p).
 - Bila beban transfer diseimbangkan, maka balok ditekan oleh gaya P yang diberikan pada angkur.
 - Jika angkur berlokasi di tengah penampang, maka distribusi tegangan sebesar P/A terjadi pada setiap penampang dan balok tidak melendut.
- ❖ Jika $w \neq w_p$, maka momen lentur tak seimbang (*unbalanced*) M_{ub} yang disebabkan oleh beban tak seimbang sebesar $(w - w_p)$, harus dihitung. Distribusi tegangan diperoleh dengan persamaan 1.9 dan harus ditambahkan pada tegangan prategang aksial (P/A).

Contoh

Distribusi tegangan di tengah bentang pada balok di atas dua tumpuan sederhana diperlihatkan pada Figure 1.13.

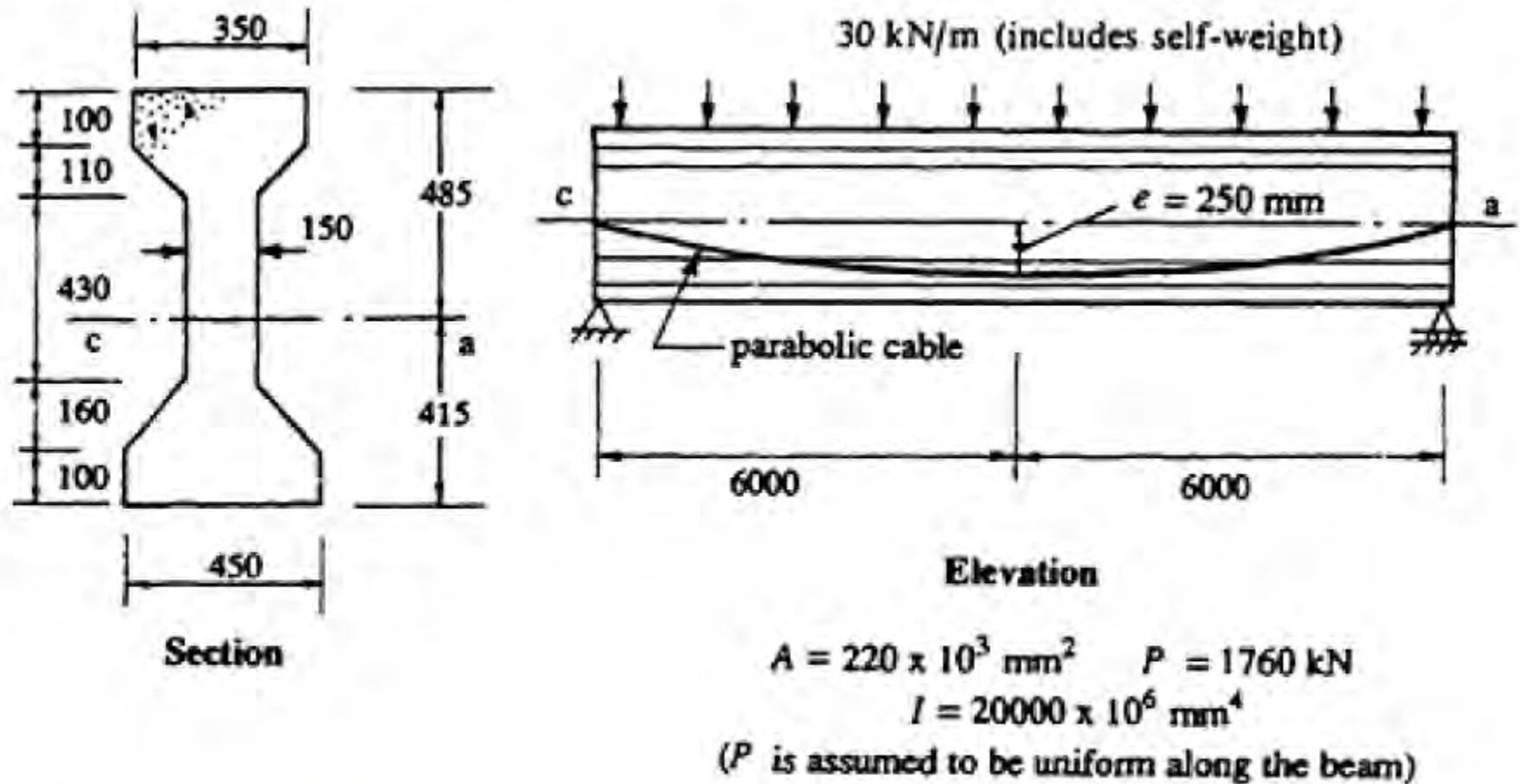


Figure 1.13 Beam of [Example 1.1](#).

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Contoh

Pendekatan kombinasi beban

Tegangan serat ekstrim (*top and bottom*) di tengah bentang (σ_t, σ_b) akibat P, Pe , dan M .

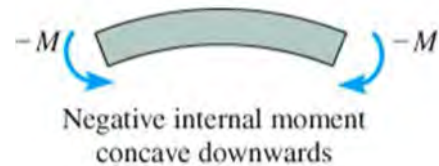
$$P = 1760 \text{ kN}; Pe = 1760 \times (250 \times 10^{-3}) = 440 \text{ kN.m}$$

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{30 \times 12^2}{8} = 540 \text{ kN.m}$$

Tegangan akibat gaya P :

$$\sigma_t = \sigma_b = -\frac{P}{A} = -\frac{1760 \times 10^3}{220 \times 10^3} = -8,0 \text{ MPa}$$

Tegangan akibat momen Pe :



$$\sigma_t = +\frac{Pe y_t}{I} = \frac{440 \times 10^6 \times 485}{20000 \times 10^6} = +10,67 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = -\frac{Pe y_b}{I} = -\frac{440 \times 10^6 \times 415}{20000 \times 10^6} = -9,13 \text{ MPa}$$

Tegangan akibat momen M :



$$\sigma_t = -\frac{M y_t}{I} = -\frac{540 \times 10^6 \times 485}{20000 \times 10^6} = -13,10 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = +\frac{M y_b}{I} = \frac{540 \times 10^6 \times 415}{20000 \times 10^6} = +11,21 \text{ MPa}$$

Contoh

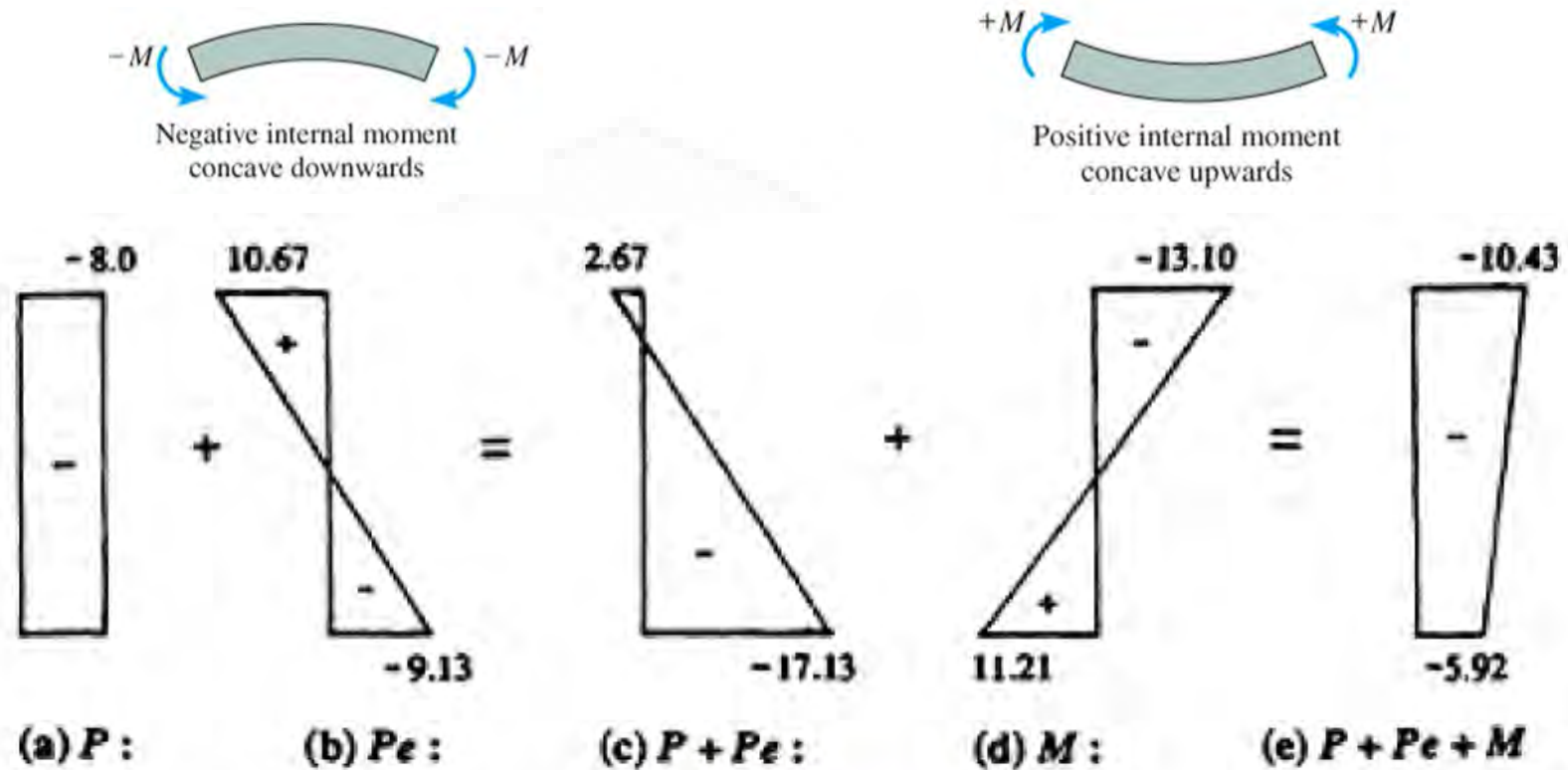


Figure 1.14 Component stress distributions in [Example 1.1](#).

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Distribusi-distribusi tegangan beton diperlihatkan pada Figures 1.14a, b dan d, dan distribusi kombinasi tegangan elastik penampang beton di tengah bentang diperlihatkan pada Figure 1.14e.

Contoh

Konsep pasangan internal

Pendekatan alternatif perhitungan tegangan elastic berdasarkan pada konsep pasangan internal persamaan 1.11:

$$l = \frac{M}{P} = \frac{540 \times 10^6}{1760 \times 10^3} = 306,8 \text{ mm}$$

Lihat Figure 1.13. Eksentrisitas: $e = 250 \text{ mm}$. Resultan gaya tekan pada penampang beton (P) adalah 1760 kN dan berlokasi pada $306,8 - 250 = 56,8 \text{ mm}$ di atas sumbu tengah.

Momen tidak seimbang (*unbalanced moment*): $M_{ub} = 1760 \times 56,8 \times 10^{-3} = 100 \text{ kN.m}$.

Tegangan beton serat ekstrim (*top and bottom*) pada Figure 1.14e:

$$\sigma_t = -\frac{P}{A} - \frac{M_{ub} y_t}{I} = -\frac{1760 \times 10^3}{220 \times 10^3} - \frac{100 \times 10^6 \times 485}{20000 \times 10^6} = -10,43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = -\frac{P}{A} + \frac{M_{ub} y_b}{I} = -\frac{1760 \times 10^3}{220 \times 10^3} + \frac{100 \times 10^6 \times 415}{20000 \times 10^6} = -5,92 \text{ MPa}$$

Contoh

Pendekatan penyeimbangan beban

Tegangan beton elastik juga dapat ditentukan dengan menggunakan prosedur penyeimbangan beban di sub bab 1.5.3. (Gilbert & Mickleborough, 2005). Gaya transfer dibebankan pada beton melalui kabel parabolik menggunakan persamaan 1.7, yaitu

$$w_p = \frac{8Pe}{L^2} = \frac{8 \times 1760 \times 10^3 \times 250}{(12000)^2} = 24,4 \text{ kN/m}$$

Beban tidak seimbang (*unbalanced load*):

$$w_{ub} = w - w_p = 30,0 - 24,4 = 5,55 \text{ kN/m} \downarrow$$

Resultan momen tidak seimbang di tengah bentang:

$$M_{ub} = \frac{w_{ub}L^2}{8} = \frac{5,55 \times 12^2}{8} = 100 \text{ kN.m}$$

Tegangan elastik di serat atas dan bawah (*top and bottom*) beton diperoleh dari penambahan tegangan P/A dengan tegangan akibat M_{ub} :

$$\sigma_t = -\frac{P}{A} - \frac{M_{ub}y_t}{I} = -10,43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = -\frac{P}{A} + \frac{M_{ub}y_b}{I} = -5,92 \text{ MPa}$$

Kondisi batas layan

- Dibandingkan dengan beton bertulang, desain elemen beton prategang awalnya berdasarkan perilaku lentur saat kondisi menahan beban kerja.
- Kekuatan batas (*ultimate*) awal dalam menahan lentur, geser, dan torsi kemudian dicek jika kemampuan layan telah memenuhi.
- Fungsi utama penarikan *strand* prategang (*prestressing*) adalah untuk mengatur agar tegangan tarik yang terjadi pada beton masih dalam batas beban yang dapat ditahan.
- Agar beton tidak retak, maka perlu memenuhi syarat batas tegangan pada serat terluar penampang.

ILMU ALAT PENGABDIAN

Batas tegangan beton dalam peraturan ACI 318

❖ Kondisi segera setelah transfer beban dari *strand* prategang ke beton (sebelum kehilangan gaya prategang akibat waktu)

- Dalam kondisi tekan : $0,6 f'_{ci}$
- Dalam kondisi tarik : $0,25 \sqrt{f'_{ci}}$ (atau $0,5 \sqrt{f'_{ci}}$ di ujung elemen sederhana)

dengan

f'_{ci} : kekuatan beton karakteristik saat transfer

Jika tegangan tarik melebihi nilai persamaan di atas, maka diperlukan baja tulangan tambahan untuk menahan gaya tarik total pada beton.

❖ Dalam kondisi layan penuh (setelah semua jenis kehilangan gaya prategang terjadi):

- Dalam kondisi tekan : $0,45 f'_c$
- Dalam kondisi tarik : $0,5 f'_c$

Jika analisis berdasarkan penampang retak transformasi memperlihatkan bahwa defleksi jangka pendek dan panjang tidak melebihi ijin, maka batas tegangan tarik diperbolehkan untuk mencapai $1,00 \sqrt{f'_c}$, maka perlu tambahan tebal selimut beton minimum sebesar 50% jika permukaan yang berpotensi retak terekspos langsung ke tanah atau lingkungan korosif.

Tegangan tekan beton pada level baja saat transfer tidak boleh lebih dari $0,5 f'_{ci}$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Batas tegangan

Jika beton didesain untuk tidak retak, maka tegangan yang harus dibatasi adalah

F_{ti} : tegangan baja saat transfer

F_t : tegangan baja di bawah beban penuh

Sebagai tambahan, yang harus dibatasi adalah

F_{ci} : tegangan beton saat transfer

F_c : tegangan beton di bawah beban penuh

Jika beton retak di bawah beban penuh diijinkan, maka tegangan batas (F_t) dapat dikurangi, tetapi tiga tegangan lainnya (F_{ti} , F_{ci} , F_c) tetap dibatasi.

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Batas tegangan saat transfer (transfer gaya: *strand* prategang baru mulai menekan beton)

Suatu penampang balok tidak retak di lokasi momen kritis diperlihatkan pada *Figure 3.1*. Tegangan beton saat transfer disebabkan oleh gaya prategang P_i {yang berlokasi pada eksentrisitas (e) di bawah sumbu tengah penampang balok} dan **momen eksternal M_o** akibat **beban yang bekerja saat transfer**. Umumnya, hanya ada berat-sendiri sebagai beban (selain prategang) yang bekerja saat transfer.

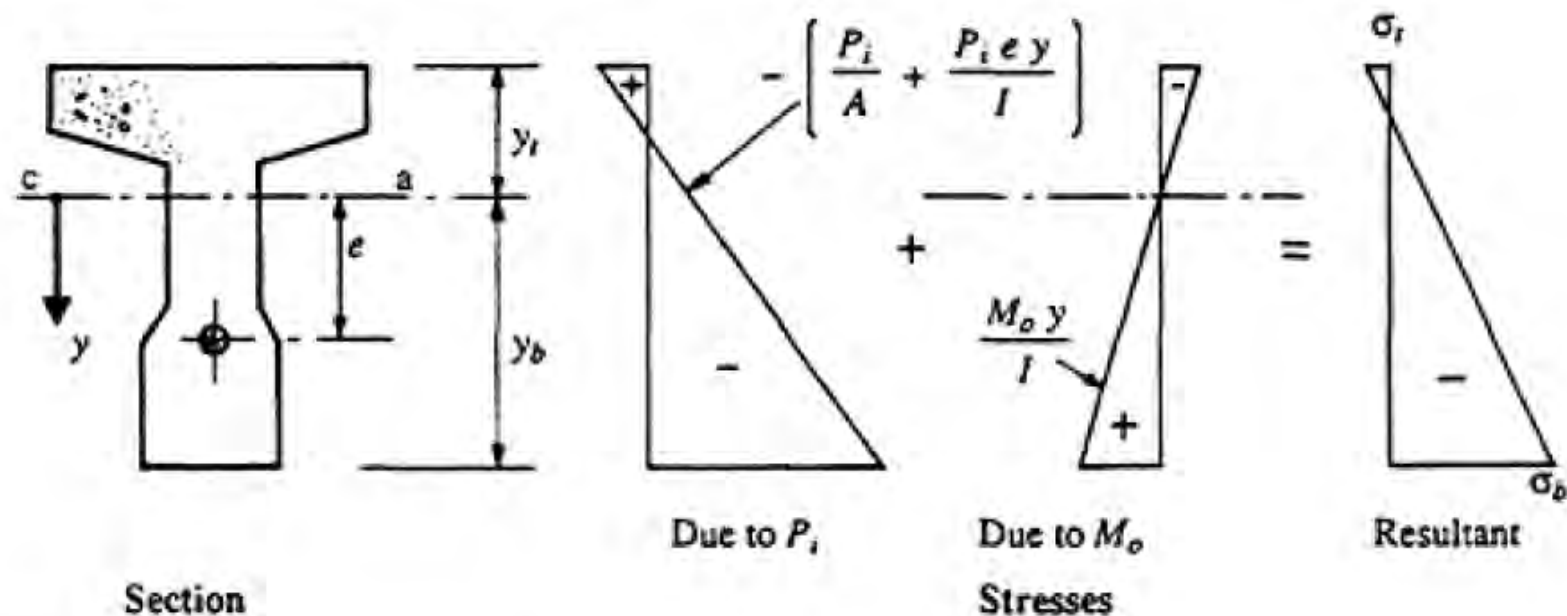
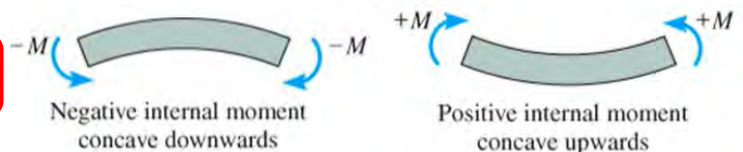


Figure 3.1 Concrete stresses at transfer.

(Sumber: Gilbert & Mikleborough, 2005)



Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Saat transfer, tegangan beton di serat atas (σ_t) tidak boleh melebihi batas tegangan tarik (F_{ti}), maka

$$\sigma_t = -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i e y_t}{I} - \frac{M_o y_t}{I} \leq F_{ti} \text{ atau } -\frac{P_i}{A} + \frac{(P_i e - M_o)}{Z_t} \leq F_{ti}$$

Urutan diatur ulang, maka persamaan di atas menjadi

$$F_{ti} \geq -\frac{P_i}{A} \left(1 - \frac{A_e}{Z_t}\right) - \frac{M_o}{Z_t} \quad (3.1)$$

dengan

P_i : gaya prategang sesaat (*immediately*) setelah transfer pada suatu bagian desain

M_o : momen eksternal akibat beban yang bekerja saat transfer tegangan dari *strand* prategang ke beton

A : luas daerah penampang

I : momen inersia penampang di sekitar sumbu tengah

Z_t : modulus penampang elastik terhadap serat atas (*top*); $Z_t = \frac{I}{y_t}$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Dengan cara yang sama, **tegangan beton di serat bawah (σ_b)** harus lebih besar daripada batas **tegangan tekan negatif (F_{ci})** saat transfer:

$$\sigma_b = -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i e}{Z_b} + \frac{M_o}{Z_b} \geq F_{ci}$$

Nilai F_{ci} adalah negatif (tegangan tekan).

Urutan diatur ulang, maka persamaan di atas menjadi:

$$F_{ci} \leq -\frac{P_i}{A} \left(1 + \frac{A_e}{Z_b} \right) + \frac{M_o}{Z_b} \quad (3.2)$$

dengan:

Z_b : modulus penampang elastik terhadap serat bawah (*bottom*); $Z_b = \frac{I}{y_b}$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Batas tegangan **setelah semua kehilangan tegangan terjadi dan saat beban penuh**

Tegangan pada beton diakibatkan oleh gaya **prategang efektif**, yaitu setelah semua jenis kehilangan terjadi ($P_e = RP_i$) dan akibat **momen dari beban servis penuh** (M_T).

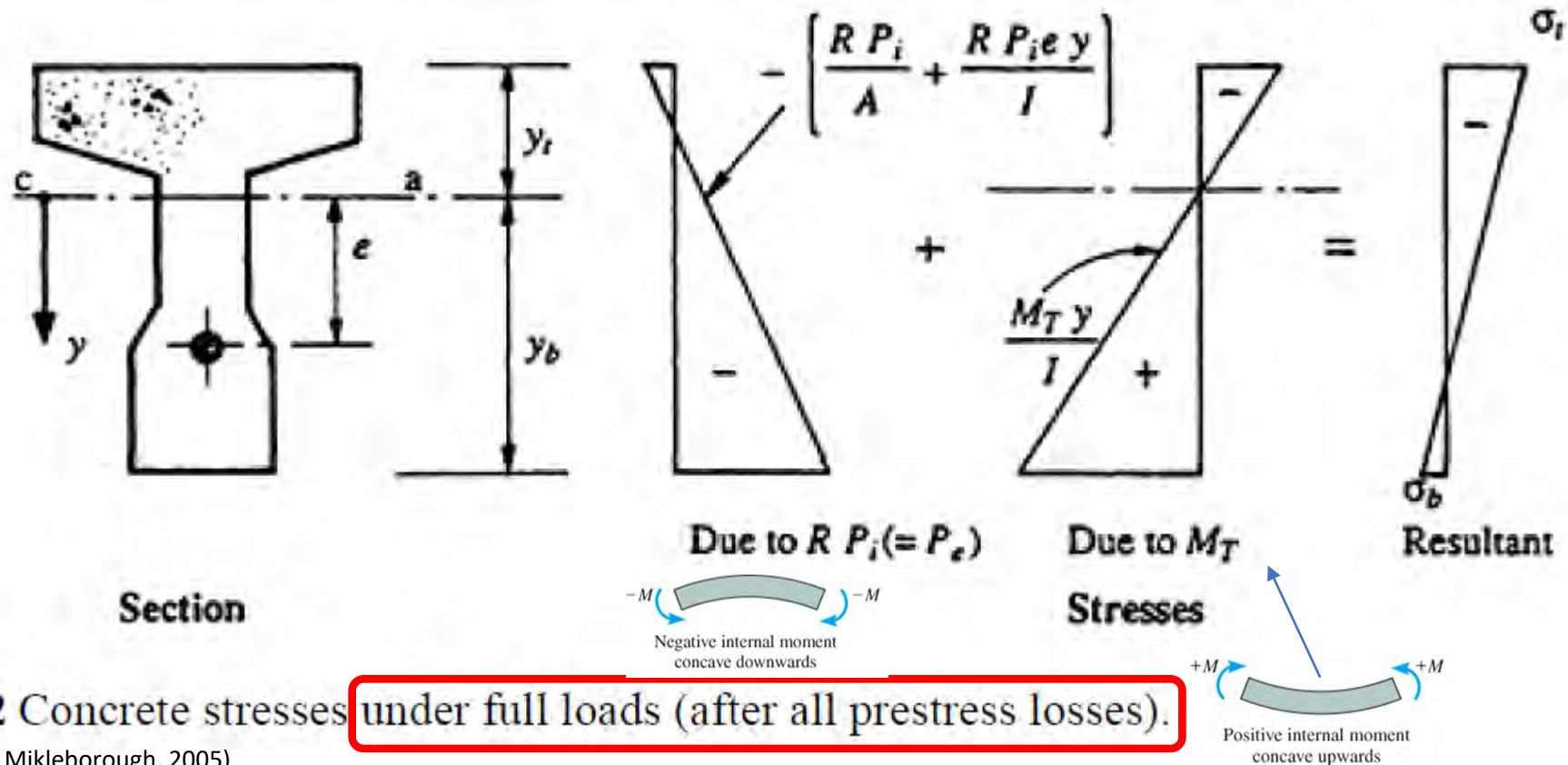


Figure 3.2 Concrete stresses under full loads (after all prestress losses).

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Untuk elemen beton yang diberi tulangan prategang penuh (tanpa *strand* tulangan biasa), tegangan beton di serat bawah (σ_b) harus kurang batas tegangan tarik (*tension*) tertentu (F_t):

$$\sigma_b = -\frac{RP_i}{A} - \frac{RP_i e}{Z_b} + \frac{M_T}{Z_b} \leq F_t$$

atau

$$F_t \geq -\frac{RP_i}{A} \left(1 + \frac{A e}{Z_b} \right) + \frac{M_T}{Z_b} \quad (3.3)$$

dengan:

P_e : gaya **prategang efektif** setelah semua jenis kehilangan terjadi ($P_e = RP_i$)

R : suatu koefisien pembanding antara P_e dan P_i ; $R < 1$

M_T : momen akibat beban servis penuh

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Tegangan beton tekan di serat atas (σ_t) harus memenuhi batas tegangan tekan (*compression*, F_c), maka

$$\sigma_t = -\frac{RP_i}{A} + \frac{RP_i e}{Z_t} - \frac{M_T}{Z_t} \geq F_c$$

atau

$$F_c \leq -\frac{RP_i}{A} \left(1 - \frac{A e}{Z_t}\right) - \frac{M_T}{Z_t} \quad (3.4)$$

Persamaan 3.1-3.4 dapat diatur ulang untuk menyatakan nilai $1/P_i$ sebagai fungsi linier e . Pengaturan ulang urutan persamaan 3.1 menghasilkan:

$$A \left(F_{ti} + \frac{M_o}{Z_t} \right) \geq -P_i \left(1 - \frac{A e}{Z_t} \right) \text{ atau } \frac{1}{P_i} \geq \frac{-1 + A e / Z_t}{A(F_{ti} + M_o / Z_t)}$$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Jika $\alpha_t = A/Z_t$, maka

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_t e - 1}{AF_{ti} + \alpha_t M_o} \quad (3.5)$$

Dengan cara yang sama, dari persamaan 3.2, 3.3, dan 3.4, maka

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{\alpha_b e + 1}{-AF_{ci} + \alpha_b M_o} \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{P_i} \leq \frac{R (\alpha_b e + 1)}{-AF_t + \alpha_b M_T} \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{P_i} \leq \frac{R (\alpha_t e + 1)}{AF_c + \alpha_t M_T} \quad (3.8)$$

dengan $\alpha_b = A/Z_b$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Diagram Magnel

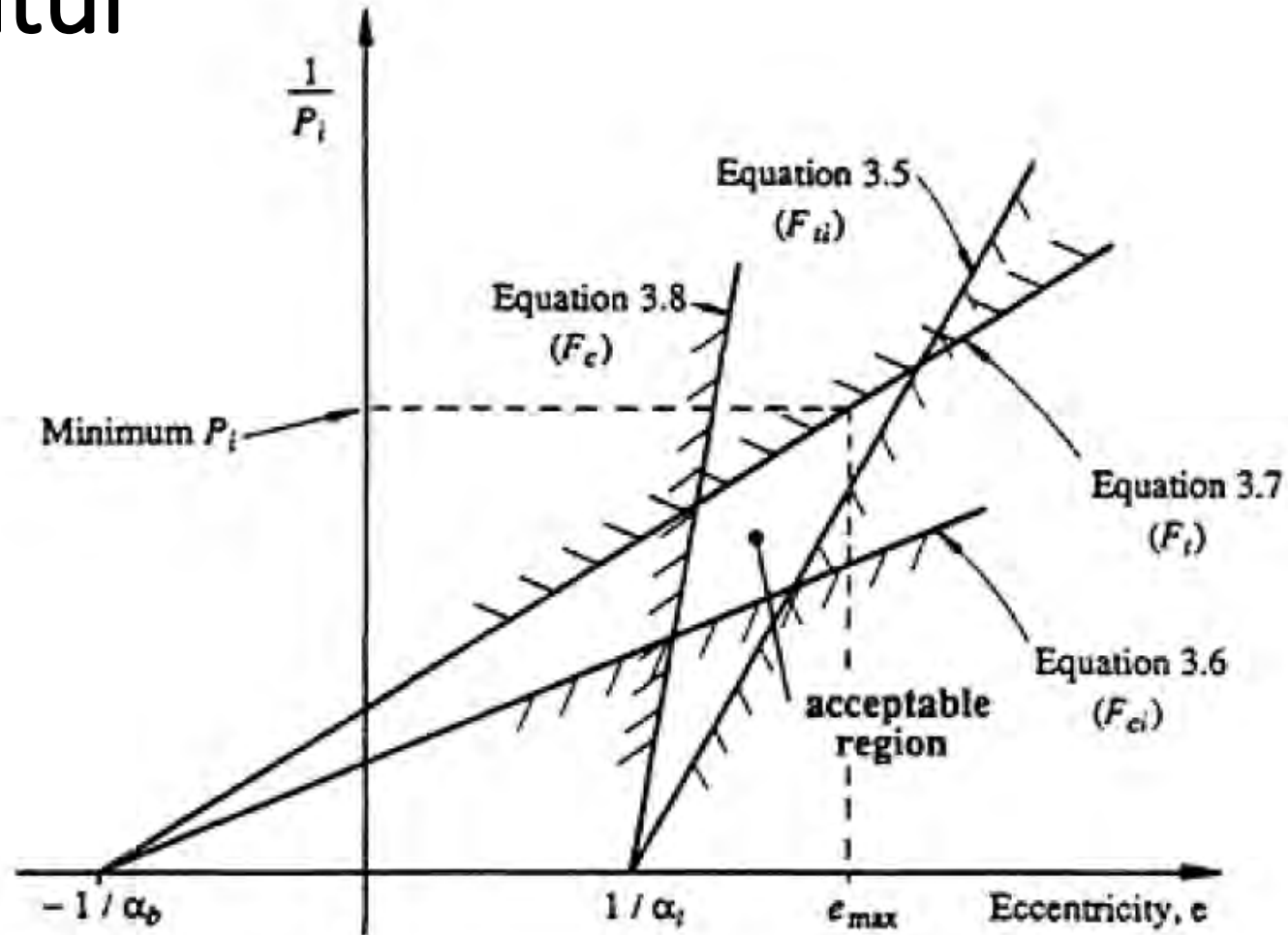


Figure 3.3 Magnel's design diagram.

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Pertemuan setiap garis di sumbu horizontal diperoleh dengan memasukkan nilai $1/P_i = 0$ pada persamaan 3.5-3.8 dan menghasilkan eksentrisitas $e = 1/\alpha_t$ (untuk persamaan 3.5 dan 3.8) dan $e = 1/\alpha_b$ (untuk persamaan 3.6 dan 3.7).
- Interpretasi secara grafis yang memberikan informasi tentang kondisi tegangan di penampang prategang pada Figure 3.3 diperkenalkan oleh Magnel (1954) dan sangat berguna dalam proses desain.
- **Nilai P_i dan e di dalam daerah jajaran genjang memenuhi yang memenuhi syarat desain yang aman.**
- Untuk **meminimalkan biaya prategang, nilai P_i terkecil dipilih** (lihat pertemuan dua garis dari persamaan 3.5 dan 3.7), tetapi umumnya nilai e tidak praktis.
- Nilai P_i terkecil diperoleh dengan mengganti eksentrisitas maksimum ke persamaan 3.7.
- Jika ukuran penampang terlalu kecil, maka garis yang dibentuk dengan persamaan 3.6 pada Figure 3.3 akan berada di atas garis persamaan 3.7, sehingga daerah jajaran genjang tidak terbentuk. Demikian pula jika garis persamaan 3.5 lebih curam daripada garis persamaan 3.8, maka daerah jajaran genjang tidak terbentuk.
- Sebaliknya, jika sudut besar dibentuk oleh garis-garis persamaan 3.6 dan 3.7 pada Figure 3.3, maka luas jajaran genjang semakin besar sehingga ukuran penampang lebih kecil dan lebih ekonomis.

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Jika penampang berukuran minimum digunakan, maka persamaan 3.6 dan 3.7 di-plot pada garis yang sama.
- Modulus penampang elastik terhadap serat bawah (*bottom*) berukuran minimum ($Z_{b \min}$) diperoleh dari persamaan 3.2 dan 3.3. Persamaan 3.2 menjadi

$$F_{ci} - \frac{M_o}{Z_{b \min}} = -\frac{P_i}{A_{\min}} \left[1 + \frac{A_{\min} e}{Z_{b \min}} \right]$$

dan persamaan 3.3 menjadi

$$\frac{1}{R} \left[F_t - \frac{M_T}{Z_{b \min}} \right] = -\frac{P_i}{A_{\min}} \left[1 + \frac{A_{\min} e}{Z_{b \min}} \right]$$

- Dengan mensubstitusikan dua persamaan ini, maka diperoleh:

$$Z_{b \min} = \frac{M_T - RM_o}{F_t - RF_{ci}} \quad (3.9)$$

dengan

M_o : momen eksternal akibat beban yang bekerja saat transfer tegangan dari *strand* prategang ke beton

M_T : momen dari beban servis penuh

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Contoh soal

- Suatu *slab satu-arah* dengan tumpuan sederhana sepanjang $L = 12 \text{ m}$ dan didesain untuk menahan beban layan (*service*) $w_s = 7 \text{ kPa}$ (kN/m^2) di luar beban berat sendiri. *Slab* tersebut dipasang tendon (*strand*) prategang *post-tensioned* dengan jarak-jarak tertentu dan profil parabolik. Data material adalah:

$f'_{ci} = 25 \text{ MPa}$ (saat transfer gaya tekan *strand* prategang ke beton dimulai);

$f'_c = 32 \text{ MPa}$ (saat beban layan penuh); $E_{ci} = 25300 \text{ MPa}$ (saat transfer);

$E_c = 28600 \text{ MPa}$ (saat beban layan penuh);

tegangan *strand* prategang: $f_p = 1840 \text{ MPa}$; massa jenis beton: $\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$

- Gaya prategang dan eksentrisitas ditentukan agar memenuhi syarat batas tegangan beton:

Tegangan baja saat transfer: $F_{ti} = 0,25\sqrt{25} = 1,25 \text{ MPa}$

Tegangan beton saat transfer: $F_{ci} = -0,5 \times 25 = -12,5 \text{ MPa}$

Tegangan baja saat beban layan penuh: $F_t = 0,25\sqrt{32} = 1,41 \text{ MPa}$

Tegangan beton saat beban layan penuh: $F_c = -0,5 \times 32 = -16,0 \text{ MPa}$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Pada tengah bentang, **kehilangan** (*loss*) gaya prategang **seketika** (*instantaneous*) dan berdasarkan **waktu** (*time-dependent*) diasumsikan berturut-turut sebesar **8% and 16%**. Untuk memperoleh berat sendiri *slab* (yang merupakan satu-satunya beban selain prategang saat transfer), coba tebal slab: $D = 0,3 \text{ m}$ ($= L/40 = 12 \text{ m}/40$). Untuk *slab* per 1 m lebar, berat sendiri (*self weight*)-nya adalah:

$$w_{sw} = \gamma_c \times D = 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 0,3 \text{ m} = 7,2 \text{ kN/m}$$

- Momen di tengah bentang saat transfer:

$$M_o = \frac{w_{sw} L^2}{8} = \frac{7,2 \times 12^2}{8} = 129,6 \text{ kN.m/m}$$

- Momen di tengah bentang saat di bawah beban layan (*service*) penuh adalah gabungan akibat beban *service* dan *self weight*:

$$M_T = \frac{(w_s + w_{sw})L^2}{8} = \frac{(7,0 + 7,2) \times 12^2}{8} = 255,6 \text{ kN.m/m}$$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Dari persamaan 3.9:

$$Z_{b \min} = \frac{M_T - RM_o}{F_t - RF_{ci}} = \frac{[255,6 - (0,84 \times 129,6)] \times 10^6}{1,41 - \{0,84 \times (-12,5)\}} = 12,3 \times 10^6 \text{ mm}^3/m$$

- Tebal minimum *slab*:

$$D_{\min} = \sqrt{6 Z_{b \min}/1000} = 272 \text{ mm. Pilih ketebalan pelat } D = 300 \text{ mm.}$$

- Properti penampang *slab*:

$$h = D = 300 \text{ mm; tinjau per 1 meter, maka: } b = 1000 \text{ mm; } A = bh = 300 \times \frac{10^3 \text{ mm}^2}{\text{per meter lebar slab}}$$

$$I = \frac{1}{12} bh^3 = 2250 \times \frac{10^6 \text{ mm}^4}{\text{per meter lebar slab}}$$

- Karena bentuk penampang *slab* persegi panjang, maka $Z = Z_t = Z_b = \frac{1}{6} bh^2 = 15 \times \frac{10^6 \text{ mm}^3}{\text{per meter lebar slab}}$;
 $\alpha_t = A/Z_t$; $\alpha_b = A/Z_b$. Karena $Z = Z_t = Z_b$, maka $\alpha_t = \alpha_b = A/Z = 0,02$; dan $1/\alpha_t = 1/\alpha_b = 50 \text{ mm}$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Persamaan 3.5-3.8 menjadi

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{0,02e - 1}{(300 \times 10^3 \times 1,25) + (0,02 \times 129,6 \times 10^6)} = \frac{0,02e - 1}{2967 \times 10^3}$$

$$\frac{1}{P_i} \geq \frac{0,02e + 1}{(-300 \times 10^3 \times (-1,25)) + (0,02 \times 129,6 \times 10^6)} = \frac{0,02e + 1}{6342 \times 10^3}$$

$$\frac{1}{P_i} \leq \frac{0,84 (0,02e + 1)}{(-300 \times 10^3 \times 1,41) + (0,02 \times 255,6 \times 10^6)} = \frac{0,02e + 1}{5582 \times 10^3}$$

$$\frac{1}{P_i} \leq \frac{0,84 (0,02e - 1)}{(300 \times 10^3 \times (-16)) + (0,02 \times 255,6 \times 10^6)} = \frac{0,02e - 1}{371,4 \times 10^3}$$

ILMU ALAT PENGABIAN

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

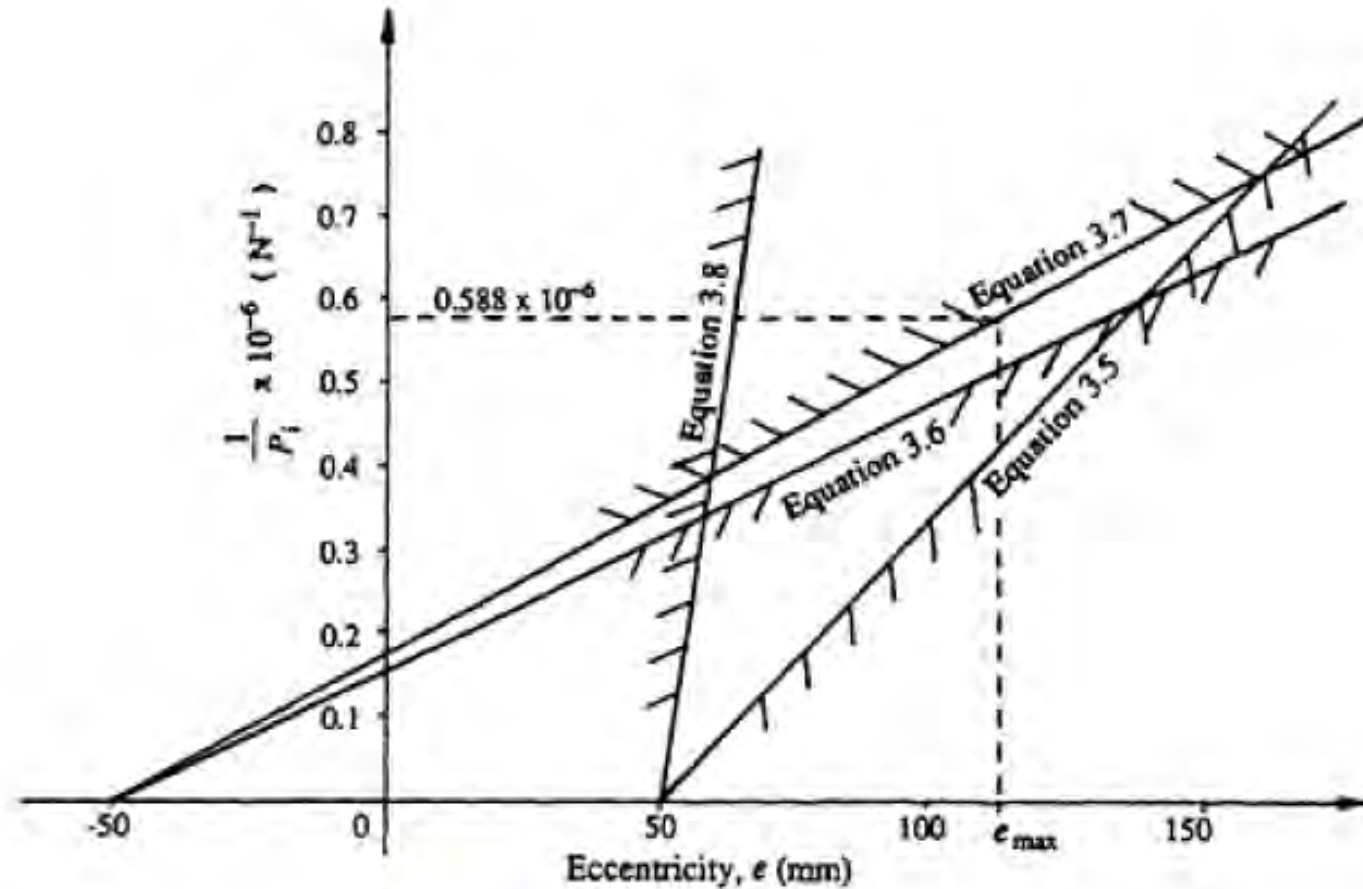


Figure 3.4 Design diagram for [Example 3.1](#).

(Sumber: Gilbert & Mickleborough, 2005)

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Jika *strand* prategang berdiameter 12,7 mm digunakan pada penampang beton dengan selimut (*cover*) beton minimum setebal 30 mm, dan $\frac{D}{2} = \frac{300}{2} = 150$ mm, maka

$$e_{maks} = \left\{ \frac{D}{2} - \left(cover + \frac{diameter\ strand}{2} \right) \right\} = \left\{ 150 - \left(30 + \frac{12,7}{2} \right) \right\} = 150 - 36 = 114\text{ mm}$$

- Dari Figure 3.4 (atau persamaan 3.7), nilai P_i minimum ijin adalah

$$\frac{1}{P_i} = 0,588 \times 10^{-6} \text{ sehingga diperoleh: } P_i = 1700 \frac{kN}{\text{per meter lebar slab}}$$

- Di titik *jacking*, gaya prategang yang diperlukan:

$$P_j = \frac{P_i}{(100 - \text{instantaneous loss})\%} = \frac{1700}{(100 - 8)\%} = 1850 \frac{kN}{\text{per meter lebar slab}}$$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Table 2.1 Tensile strengths of Australian prestressing steels (AS 3600–1988).

Material type and Standard	Nominal diameter mm	A_p Area mm ²	P_u Minimum breaking load kN	$f_p = P_u / A_p$ Minimum tensile strength (f_p) MPa
Wire	5	19.6	30.4	1550
	5	19.6	33.3	1700
	7	38.5	65.5	1700
7-wire strand super grade	9.3	54.7	102	1860
	12.7	100	184	1840
	15.2	143	250	1750
7-wire strand regular grade	12.7	94.3	165	1750
Bars (super grade)	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

Catatan: setiap produsen *strand* (tendon) prategang mengeluarkan data yang berbeda

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

Dari Tabel 2.1., *7-wire strand super grade* berdiameter 12,7 mm jenis *low-relaxation* memiliki luas penampang 100 mm^2 dan beban putus (*breaking load; P_u*) minimum 184 kN. Selongsong (*duct*) dipasang datar berisi 4 *strand* berdiameter 12,7 mm. Empat *strand* tersebut ditarik dalam proses prategang dengan gaya *jacking* maksimum sebesar:

$$P_{j \text{ 1 kabel}} = 0,85 \times \text{jumlah strand} \times P_u = 0,85 \times 4 \times 184 = 626 \text{ kN}$$

Jumlah minimum kabel (setiap kabel berisi 4 *strand*) yang diperlukan setiap lebar 1 meter *slab* adalah:

$$\text{Jumlah minimum kabel} = \frac{P_j}{P_{j \text{ 1 kabel}}} = \frac{1850 \text{ kN/m}}{626 \text{ kN}} = 2,96/m$$

← Halaman 34

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Jarak spasi maksimum antar kabel = $\frac{1 \text{ meter}}{\text{Jumlah minimum kabel}} = \frac{1000}{2,96} = 338 \text{ mm} \approx 333 \text{ mm}$
Maka jarak setiap kabel yang berisi 4 *strand tendon* adalah 333 mm (ada 3 kabel per 1 meter lebar *slab*)
- Untuk memeriksa lendutan, gunakan data penampang *gross*. Retak dicegah untuk terjadi pada saat transfer dan saat di bawah beban servis penuh.
- Diasumsikan bahwa beban layan (w_s) 7 kPa (kN/m²) terdiri dari 3 kPa beban layan tetap (*sustainable service*; w_{ss}) dan 4 kPa beban layan sementara (*temporary*; w_v).

Saat transfer

- Diketahui: $E_{ci} = 25300 \text{ MPa}$ dan $I = 2250 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$
- Beban merata yang mengarah ke atas akibat kabel berbentuk parabolik dalam (*draped tendon*) sejarak 114 mm (= 0,114 m) dihitung dengan persamaan (1.7):

Halaman 29

$$w_{p \text{ transfer}} = P\phi_p = \frac{8 P e}{L^2} = \frac{8 \times 1700 \times 0,114}{12^2} = 10,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \uparrow$$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Resultan gaya ke atas: $w_r = w_{p \text{ transfer}} - w_{sw} = 10,8 - 7,2 = 3,6 \frac{kN}{m} \uparrow$
- Defleksi saat transfer:

$$v_i = \frac{5}{384} \times \frac{w_r L^4}{E_{ci} I} = \frac{5}{384} \times \frac{3,6 \times 12000^4}{25300 \times (2250 \times 10^6)} = 17,0 \text{ mm} \uparrow$$

Saat di bawah beban layan penuh

- Diketahui: $E_c = 28600 \text{ MPa}$
- Setelah *time-dependent losses*, gaya prategang berkurang 16%, maka

$$w_p = (100 - 16)\% \times w_{p \text{ transfer}} = (100 - 16)\% \times 10,8 = 9,1 \text{ kN/m} \uparrow$$

- Beban eksternal tetap = $w_{sw} + w_{ss} = 7,2 + 3,0 = 10,2 \text{ kN/m} \downarrow$
- Defleksi jangka pendek akibat beban permanen (*sustainable*):

$$v_{sus} = \frac{5}{384} \times \frac{(\text{beban eksternal tetap} - w_p) L^4}{E_c I} = \frac{5}{384} \times \frac{(10,2 - 9,1) \times 12000^4}{28600 \times (2250 \times 10^6)} = 4,8 \text{ mm} \downarrow$$

Penentuan prategang dan eksentrisitas pada elemen lentur

- Untuk *slab* yang tidak retak, defleksi jangka panjang (*long term*) akibat rangkai dan susut adalah minimal 3 kali defleksi jangka pendek akibat semua beban tetap, maka

$$v_{LT} \approx 3 \times v_{sus} = 14,4 \text{ mm} \downarrow$$

- Defleksi seketika (*instantaneous*) akibat beban layan variabel sementara $w_v = 4 \text{ kN/m}^2$ adalah

$$v_v = \frac{5}{384} \times \frac{w_v \times L^4}{E_c I} = \frac{5}{384} \times \frac{4 \times (12000)^4}{28600 (2250 \times 10^6)} = 16,8 \text{ mm} \downarrow$$

- Total defleksi maksimum:

$$v_{tot} = v_{sus} + v_{LT} + v_v = 36,0 \text{ mm} \downarrow$$

- Nilai defleksi ini harus dibandingkan dengan defleksi ijin. Persamaan defleksi ijin ada dalam SNI 2847:2019. Selengkapnya, harus menganalisis kekuatan, semua kehilangan gaya prategang (*loss*), dan desain zona angkur.

Referensi

- Gibert, R.I. dan Mickleborough, N.C., (2005): *Design of Prestressed Concrete*, Spon Press-Taylor and Francis Group, London and New York.





TKS 422314

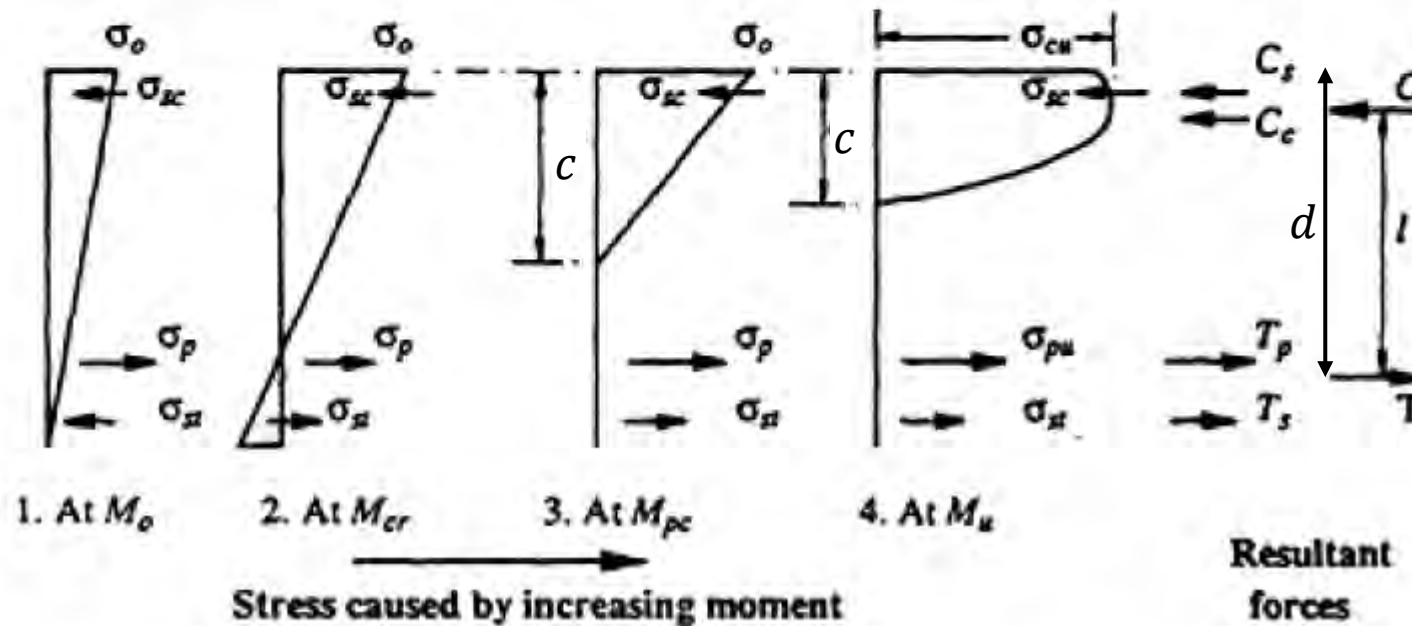
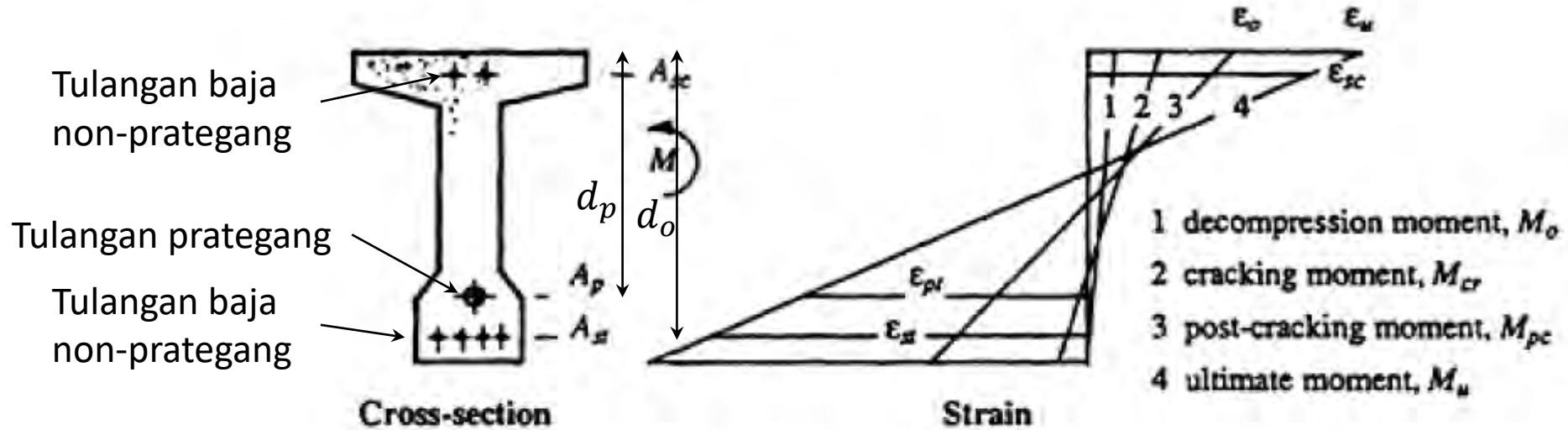
Struktur Beton Prategang

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Pengajar: Dr. Ir. Siti Aisyah Nurjannah. S.T., M.T.

Available on: <http://bit.ly/S1UnsriBetonPrategang>

Perilaku lentur saat kelebihan beban



Kapasitas momen *ultimate*:

$$M_u = Cl = Tl \quad (4.1)$$

$$l \approx 0,9d$$

Keterangan

A_{sc}	: luas baja tulangan (<i>steel bar</i>) non-prategang kondisi tekan
A_p	: luas baja prategang (<i>prestressed</i>)
A_{st}	: luas baja tulangan (<i>steel bar</i>) non-prategang kondisi tarik
c	: tinggi blok tegangan tekan
d	: kedalaman resultan gaya tarik T
d_p	: kedalaman (depth) baja prategang
d_o	: kedalaman (depth) baja non-prategang
C_s	: gaya tekan (<i>compression</i>) pada baja tulangan (<i>steel bar</i>)
C_c	: gaya tekan (<i>compression</i>) pada beton (<i>concrete</i>)
C	: resultan gaya tekan C_s dan C_c
l	: lengan momen resultan gaya tekan (<i>compression</i>) C dan tarik (<i>tension</i>) T
T_p	: gaya tarik (<i>tension</i>) tulangan prategang
T_s	: gaya tarik (<i>tension</i>) baja tulangan non-prategang
T	: resultan gaya tarik T_p dan T_s
ϵ_o	: regangan serat atas beton kondisi no. 1, 2, dan 3
ϵ_u	: regangan serat atas beton kondisi no. 4 (<i>ultimate</i>)
ϵ_{sc}	: regangan baja tulangan nonprategang kondisi tekan (<i>compression</i>)
ϵ_{pt}	: regangan baja prategang kondisi tarik (<i>tension</i>)
ϵ_{st}	: regangan baja tulangan nonprategang kondisi tarik (<i>tension</i>)
σ_o	: tegangan beton serat atas kondisi decompression (tertekan)
σ_{sc}	: tegangan pada baja tulangan (<i>steel bar</i>) non-prategang kondisi tekan (<i>compression</i>)
σ_p	: tegangan pada baja prategang (<i>prestressed</i>)
σ_{st}	: tegangan pada baja tulangan (<i>steel bar</i>) non-prategang kondisi tarik (<i>tension</i>)
σ_{ce}	: tegangan beton serat atas kondisi <i>ultimate</i>

Teori lentur: blok tegangan tekan kotak ideal untuk beton

Keterangan Figure 4.1: Bila regangan baja ϵ_p melebihi sekitar 0,01 (untuk kawat atau kumpulan tendon), kurva tegangan-regangan menjadi relatif datar dan laju peningkatan tegangan dengan regangan kecil. Setelah leleh, gaya tarik internal resultan, T ($= T_s + T_p$) pada Figure 4.1 tetap mendekati konstan (seperti halnya gaya tekan internal resultan C , yang sama dan berlawanan dengan T).

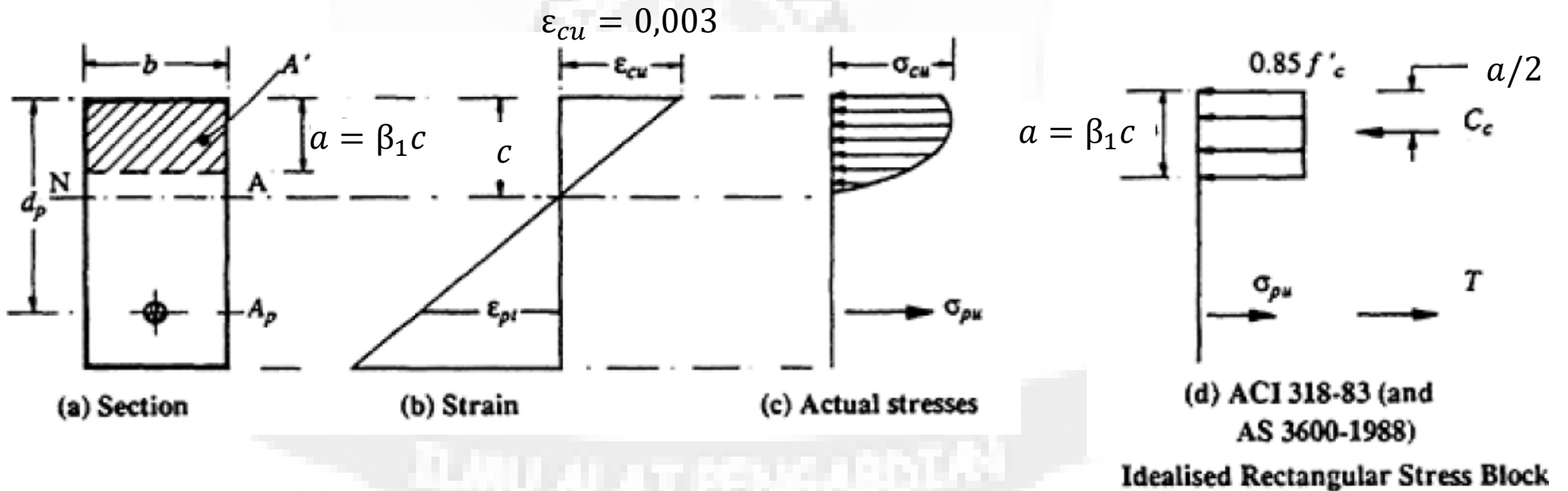


Figure 4.2 Ultimate moment conditions and rectangular stress blocks.

Teori lentur: blok tegangan tekan kotak ideal untuk beton

Hubungan antara tinggi blok tegangan tekan penampang segi empat ekuivalen (a) dan tinggi sumbu netral (c) adalah:

$$a = \beta_1 c$$

Faktor pengali tinggi blok tegangan tekan (β_1) adalah (SNI 2847:2019 pasal 22.2.2.4.3):

$$\beta_1 = 0,85$$

$$\text{untuk } 17 \leq f'_c \leq 28 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f'_c - 28}{7} \geq 0,65 \text{ untuk } 28 < f'_c < 55 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

$$\beta_1 = 0,65$$

$$\text{untuk } 55 \text{ MPa} \leq f'_c$$

Gaya tekan beton:

$$C = 0,85 f'_c b a \quad (4.3)$$

Teori lentur: blok tegangan tekan kotak ideal untuk beton

Momen batas (*ultimate*) diperoleh dari persamaan 4.1:

$$M_u = Tl = \sigma_{pu} A_p \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (4.4)$$

di mana σ_{pu} adalah tegangan pada tendon terikat dan ditentukan dari pertimbangan kompatibilitas dan kesetimbangan regangan.

Faktor reduksi kekuatan:

$$\phi = 0,9$$

Kelengkungan batas (*ultimate curvature*) adalah kemiringan diagram regangan saat keruntuhan:

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0,003}{c} \quad (4.5)$$

Peraturan dari Australia (AS 3600) menentukan bahwa $c \leq 0,4d_p$, maka

$$\varphi_u = \frac{0,003}{0,4d_p} = \frac{0,0075}{d_p} \quad (4.6)$$

Momen *ultimate* persamaan (4.4) menjadi:

$$M_u = \frac{\sigma_{pu}}{1,15} A_p \left(d_p - \frac{0,45 c}{2} \right) \quad (4.7)$$

Komponen regangan baja prategang

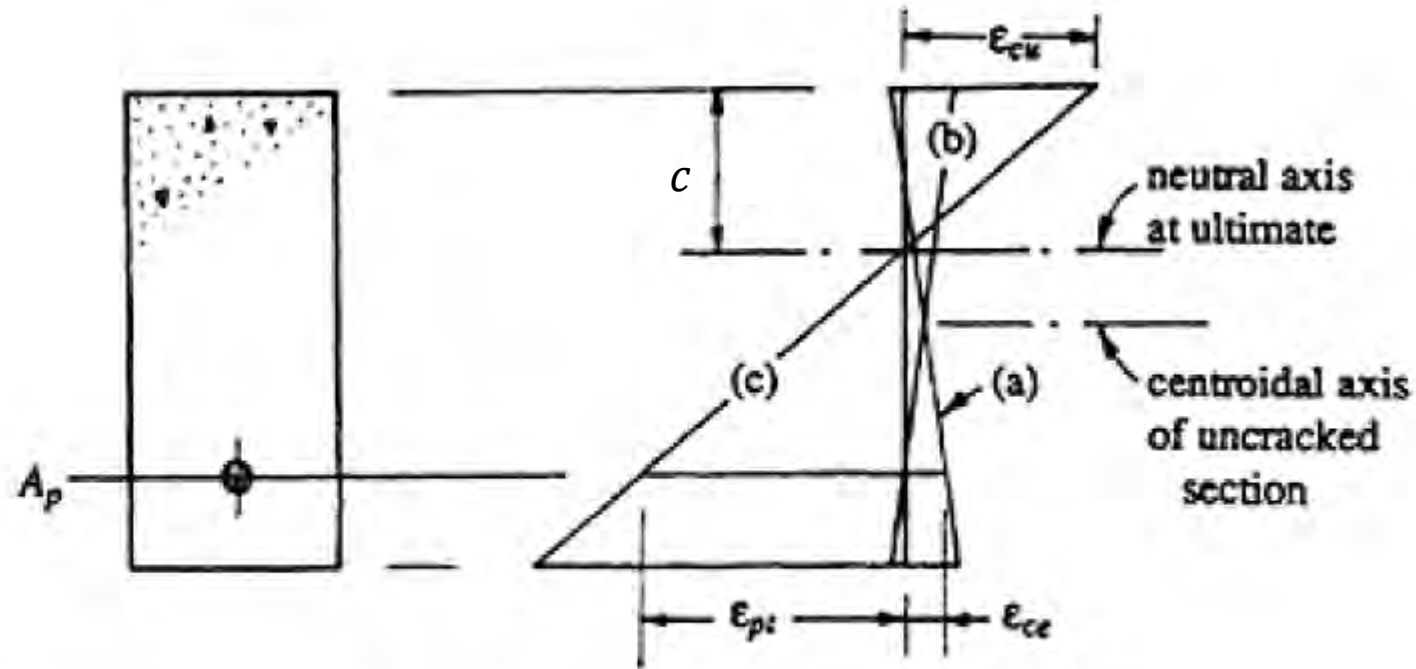


Figure 4.3 Strain distributions at three stages of loading.

- **Kondisi (a)** memperlihatkan regangan beton elastik akibat gaya prategang efektif **saat momen eksternal = 0**.

Regangan tekan beton di level baja tulangan:

$$\epsilon_{ce} = \frac{1}{E_c} \left(\frac{P_e}{A} + \frac{P_e e^2}{I} \right) \quad (4.8)$$

Tegangan baja prategang: $\sigma_{pe} = \frac{P_e}{A_p} \quad (4.9.a)$

Regangan baja prategang: $\epsilon_{pe} = \frac{\sigma_{pe}}{E_p} \quad (4.9.b)$

e : eksentrisitas (lihat file 04 Prategang dan eksentrisitas.pdf hlm. 2 dan 3)

Komponen regangan baja prategang

- **Kondisi (b)**: distribusi regangan beton saat momen menyebabkan tekanan pada beton di level baja tulangan.
- Regangan kondisi (b) sama dengan kondisi (a) ditambah dengan kenaikan regangan ϵ_{ce} (persamaan 4.8).
- **Diagram regangan (c)**: kondisi beban *ultimate*. Regangan beton di level baja tulangan ϵ_{pt} dinyatakan dalam regangan serat tekan ekstrim ϵ_{cu} dan tinggi sumbu netral saat runtuh (c):

$$\epsilon_{pt} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_p - c}{c} \right) \quad (4.10)$$

- Pada kondisi kompatibilitas regangan yang harus terpenuhi, perubahan regangan baja prategang antara kondisi beban (b) dan (c) adalah sama dengan ϵ_{pt} , maka **regangan tendon prategang** saat kondisi beban *ultimate* adalah:

$$\text{Regangan baja prategang ultimate} \longleftarrow \epsilon_{pu} = \overset{\substack{\text{Regangan baja prategang efektif} \\ \uparrow}}{\epsilon_{pe}} + \overset{\substack{\text{Regangan beton di level baja prategang (kondisi (a))} \\ \nearrow}}{\epsilon_{ce}} + \epsilon_{pt} \longrightarrow \text{Regangan baja prategang (kondisi (c))} \quad (4.11)$$

- Umumnya, regangan ϵ_{ce} (persamaan 4.8) sangat kecil dibandingkan dengan regangan ϵ_{pe} (4.9.b) atau ϵ_{pt} (4.10), dan biasanya diabaikan tanpa menyebabkan kesalahan perhitungan.

Penentuan momen *ultimate* (M_u) pada penampang dengan tendon prategang

Dengan nilai **tinggi sumbu netral saat runtuh** (c) yang akurat (yaitu jika gaya $C = T$), maka kekuatan lentur *ultimate* (M_u) dapat diperoleh dengan persamaan 4.4. Nilai c diperoleh dari iterasi dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pilih suatu nilai c sebagai awal langkah iterasi dan tentukan ε_{pu} dari persamaan (4.11). Dengan memperhitungkan gaya tarik baja tulangan (T) terhadap gaya tekan beton (C), maka tegangan di tendon prategang adalah:

$$T = \sigma_{pu}A_p = C = 0,85f'_c b a \quad \text{maka } \sigma_{pu} = \frac{0,85f'_c b a}{A_p}$$

Penentuan momen *ultimate* (M_u) pada penampang dengan tendon prategang

2. Plot titik $\varepsilon_{pu}, \sigma_{pu}$ pada kurva tegangan-regangan baja prategang. Jika titik tersebut terletak pada kurva, maka nilai c pada langkah ke-1 benar. Jika titik $\varepsilon_{pu}, \sigma_{pu}$ tidak terletak pada kurva tegangan-regangan baja prategang, berarti nilai c tidak akurat.
3. Jika titik $\varepsilon_{pu}, \sigma_{pu}$ pada langkah ke-2 tidak cukup mendekati kurva tegangan-regangan, ulangi langkah ke-1 dan 2 dengan nilai c yang berbeda. Nilai c yang lebih besar diperlukan jika lokasi titik yang diperoleh di bawah kurva. Sebaliknya, Nilai c yang lebih kecil diperlukan jika lokasi titik yang diperoleh di atas kurva.
4. Interpolasi plot titik-titik dari langkah 2 dan 3 untuk mendapatkan nilai ε_{pu} dan σ_{pu} yang berhubungan dengan c .
5. Dengan nilai σ_{pu} dan c yang benar pada langkah ke-4, hitung momen *ultimate* (M_u). Jika daerah di atas sumbu netral berbentuk segi empat, nilai M_u diperoleh dari persamaan 4.4. Penampang yang tidak berbentuk segi empat dipaparkan dalam sub bab 4.6 (Gibert dan Mickleborough, 2005).

Contoh soal 4.1: Ada tendon prategang, tidak ada baja tarik dan tekan nonprategang

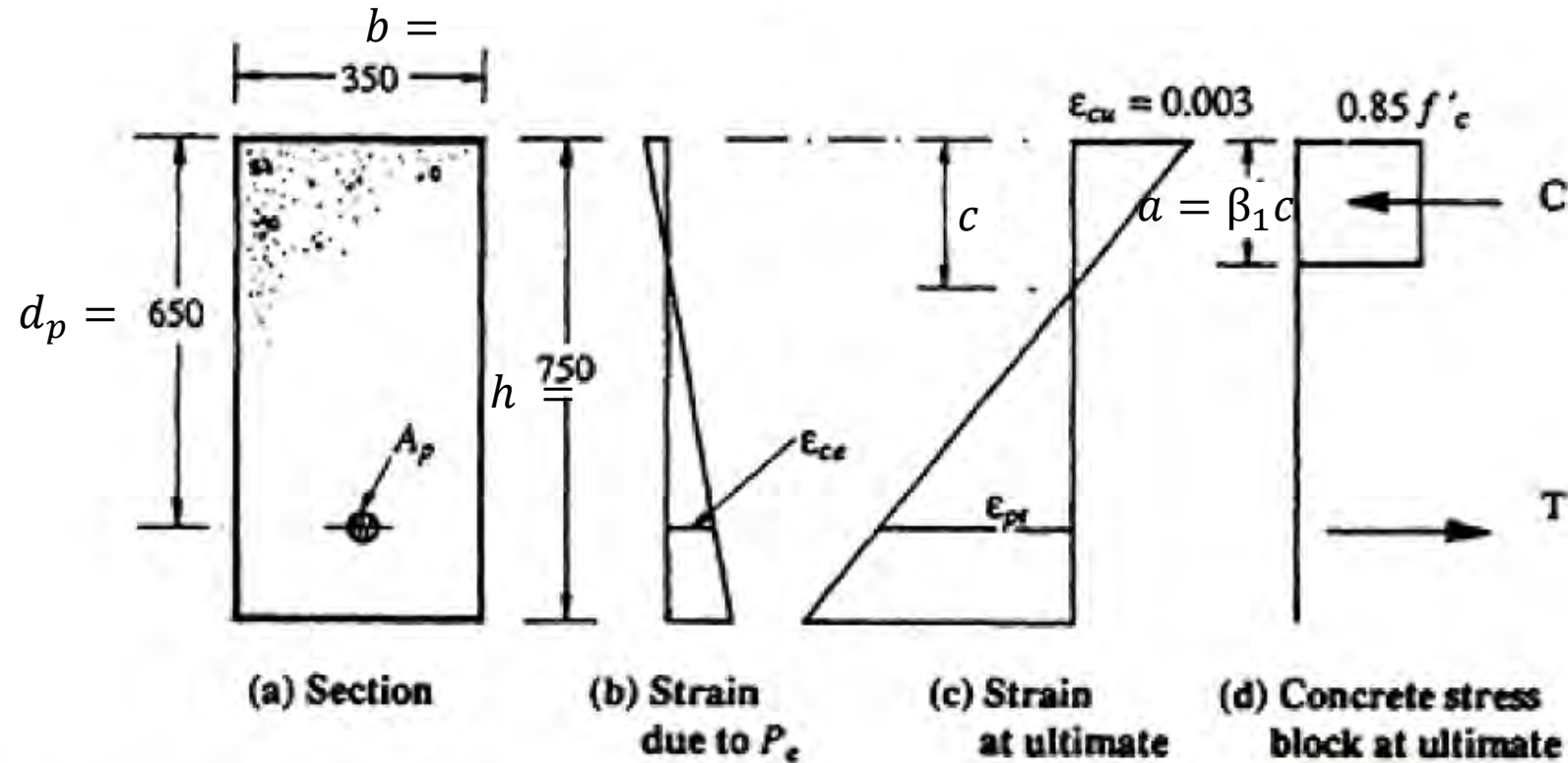


Figure 4.4 Section details and stress and strain distributions at ultimate ([Example 4.1](#)).

Tentukan momen *ultimate* (M_u). Diketahui:

Tendon baja terdiri dari 10 *strand* yang masing-masing berdiameter 12,7 mm dan luas 1 strand adalah 98,71 mm². Luas tulangan prategang: $A_p = 10 \times 98,71 = 987,1 \approx 1000 \text{ mm}^2$. Gaya prategang efektif $P_e = 1200 \text{ kN}$.

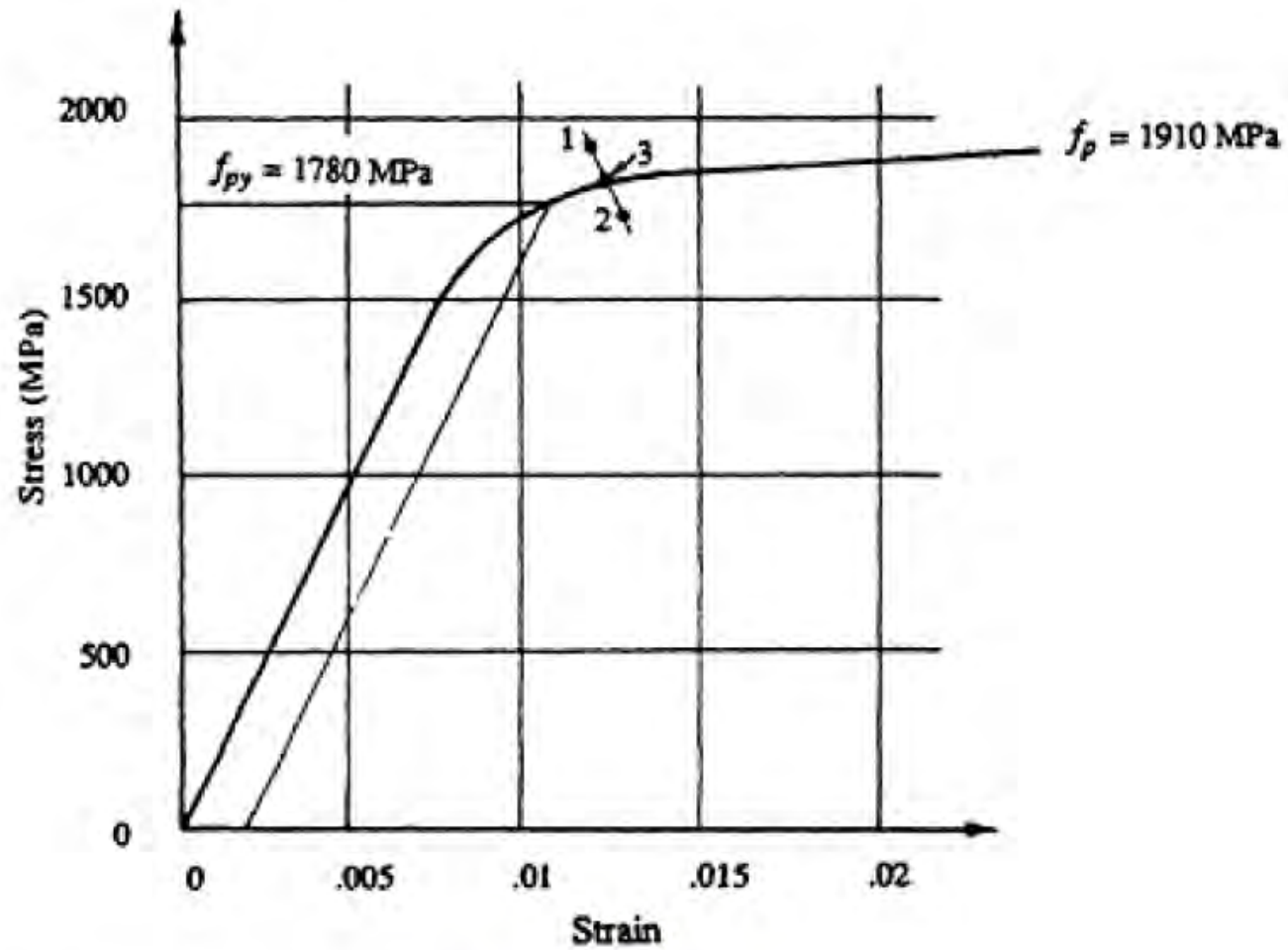


Figure 4.5 Stress–strain curve for strand ([Example 4.1](#)).

Kurva hubungan tegangan-regangan untuk baja prategang diperlihatkan pada Figure 4.5.

Modulus elastik tendon baja: $E_p = 195 \times 10^3 \text{ MPa}$

Kuat tekan beton: $f'_c = 35 \text{ MPa}$

Modulus elastik beton: $E_c = 29800 \text{ MPa}$

$\beta_1 = 0,801$ (dari persamaan 4.2); $a = \beta_1 c$

Eksentrisitas: $e = 275 \text{ mm}$

Regangan awal tendon akibat gaya prategang efektif diperoleh dari persamaan 4.9:

$$\varepsilon_{pe} = \frac{P_e}{E_p A_p} = \frac{1200 \times 10^3}{195 \times 10^3 \times 1000} = 0,00615$$

Regangan beton yang diakibatkan oleh gaya prategang efektif di level baja prategang (ε_{ce} pada Figure 4.4b) diperoleh dengan persamaan 4.8. Karena $\varepsilon_{ce} \ll \varepsilon_{pe}$, umumnya diperbolehkan untuk menggunakan penampang *gross* dalam perhitungan, maka

$$\varepsilon_{ce} = \frac{1}{E_c} \left(\frac{P_e}{A} + \frac{P_e e^2}{I} \right) = \frac{1}{29800} \left[\frac{1200 \times 10^3}{750 \times 350} + \frac{1200 \times 10^3 \times 275^2}{\frac{1}{12} (350)(750)^3} \right] = 0,00040$$

Momen inersia: $I = \frac{1}{12} b h^3$

Regangan beton di level baja prategang saat runtuh (*failure*) diperoleh dengan persamaan 4.10:

$$\varepsilon_{pt} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_p - c}{c} \right) = 0,003 \left(\frac{650 - c}{c} \right)$$

dan regangan akhir baja prategang diperoleh dari persamaan 4.11:

$$\varepsilon_{pu} = \varepsilon_{pe} + \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{pt} = 0,00655 + 0,00040 + 0,003 \left(\frac{650 - c}{c} \right)$$

Besarnya gaya tekan resultan beton (tidak ada tulangan baja tekan nonprategang) C pada penampang persegi empat adalah volume blok tegangan pada Figure 4.4d dan diperoleh dari persamaan 4.3:

$$C = 0,85 f'_c b a = 0,85 f'_c b \beta_1 c = 0,85 \times 35 \times 350 \times 0,801 \times c = 8340c$$

Gaya tarik resultan T adalah

$$T = A_p \sigma_{pu}$$

Keseimbangan gaya horizontal menyebabkan gaya $C = T$ maka

$$\sigma_{pu} = 8,34 c$$

Nilai-nilai coba c dapat dipilih dan nilai-nilai regangan (ϵ_{pu}) dan tegangan (σ_{pu}) diplot pada kurva tegangan-regangan baja prategang Figure 4.5.

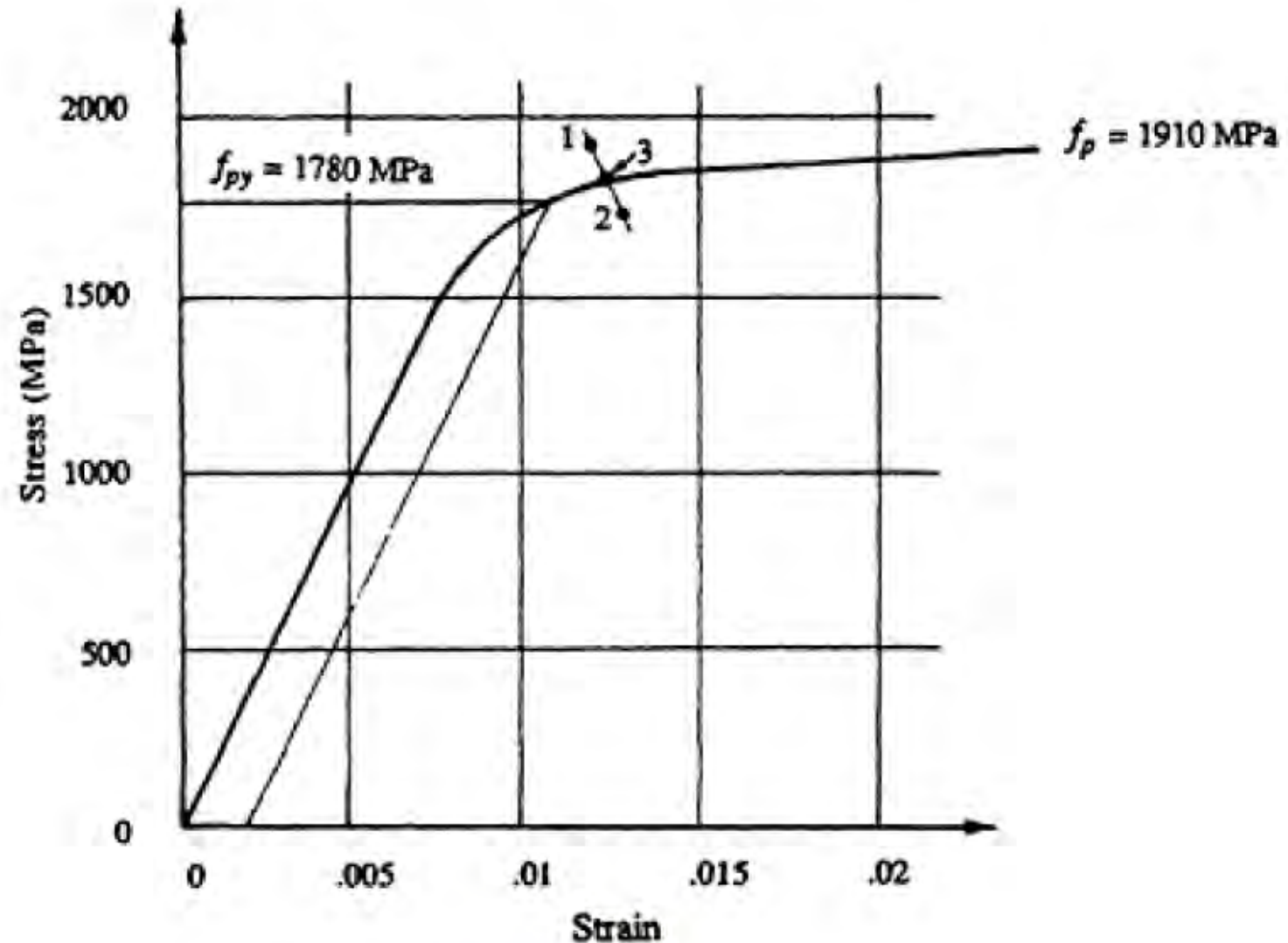


Figure 4.5 Stress–strain curve for strand ([Example 4.1](#)).

Trial c (mm)	ε_{pu}	σ_{pu} (MPa)	Point plotted on Figure 4.5
230	0.0120	1918	(1)
210	0.0128	1751	(2)
220	0.0124	1835	(3)

Titik 3 terletak cukup dekat dengan kurva tegangan-regangan tendon, maka nilai c yang benar adalah sekitar 220 mm ($0,34d_p$).

Dari persamaan 4.5, kelengkungan saat kondisi *ultimate* adalah

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0,003}{220} = 13,6 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

yang lebih besar daripada nilai perlu minimum untuk daktilitas dari persamaan 4.6

$$\varphi_{u \text{ min}} = \frac{0,003}{0,4d_p} = \frac{0,0075}{650} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

Momen *ultimate* diperoleh dari persamaan 4.4 dan $a = \beta_1 c$:

$$M_u = Tl = \sigma_{pu} A_p \left(d_p - \frac{a}{2} \right) = 1835 \times 1000 \left(650 - \frac{0,801 \times 220}{2} \right) \times 10^{-6} = 1030 \text{ kN.m}$$

Untuk desain, kekuatan penampang adalah ϕM_u , dengan nilai ϕ dari Tabel 1.1. (Gilbert dan dan Mickleborough, 2005) dan SNI 2847:2019 Tabel 21.2.1.

Table 1.1 Strength reduction factors (ACI 318)

Type of Action	ACI 318
(a) Flexure (with or without axial tension) and Axial tension	0,65 – 0,9
(b) Axial Compression and Axial Compression with Flexure	
(i) Spiral reinforcement	0,75
(ii) Tied reinforcement	0,75
For small axial compression, ϕ may be increased linearly from the value given in (b) to the value given in (a) as the axial compression tends to zero.	
(c) Shear and torsion	0,65
(d) Bearing on Concrete	0,65

Nilai momen dari hasil kombinasi pembebanan terbesar (M^*) harus lebih kecil atau sama dengan ϕM_u (sub bab 1.7.3; Gibert dan Mickleborough, 2005).

$$\phi M_u \geq M^*$$

Catatan

	Gibert dan Mickleborough, 2005	SNI 2847:2019 dan ACI 318-2019
Kemampuan nominal penampang dalam menahan momen	M_u	M_n
Momen <i>ultimate</i> terfaktor, misalnya akibat 1,2 <i>Dead Load</i> + 1,6 <i>Live Load</i>	M^*	M_u
Syarat kekuatan	$\phi M_u \geq M^*$	$\phi M_n \geq M_u$

- Prinsipnya sama antara Gilbert dan Mickleborough (2005) dengan SNI 2847:2019 dan ACI 314-2019.

Penampang berisi baja nonprategang dan tendon ikat prategang

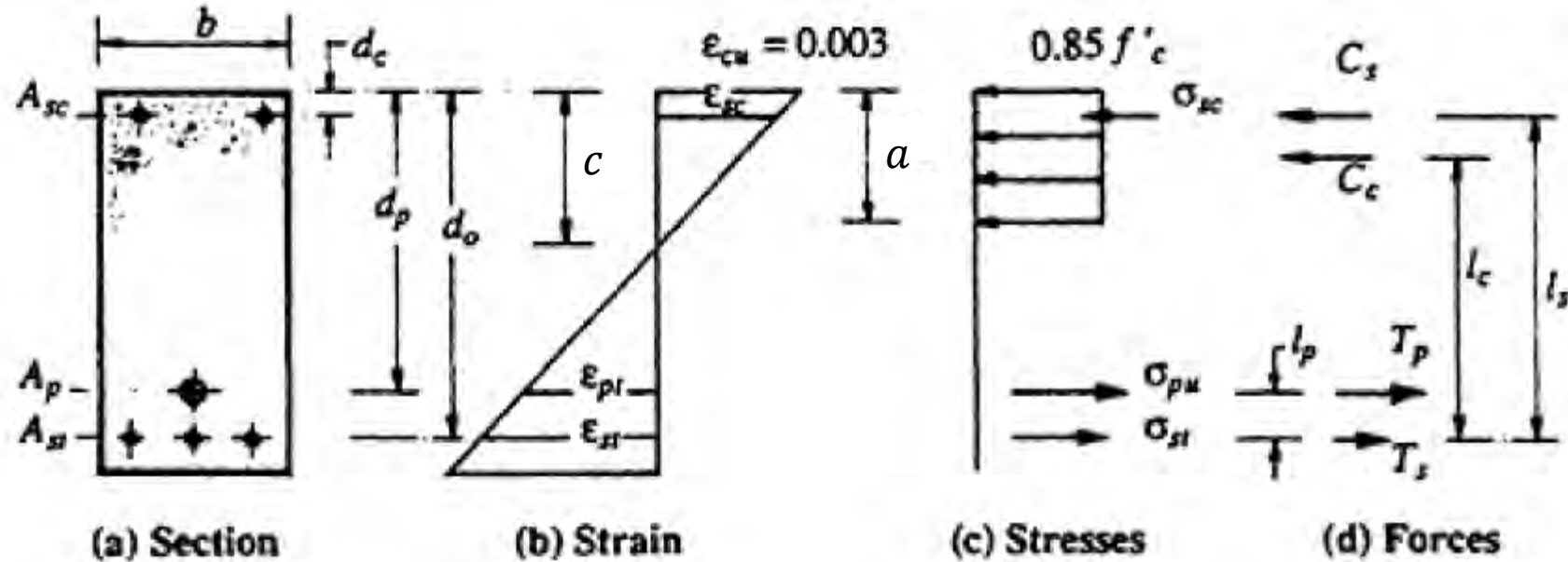


Figure 4.6 Doubly reinforced section at ultimate.

Penampang dengan tulangan baja nonprategang dan tendon ikat prategang diperlihatkan pada Figure 4.6a.

Resultan gaya tekan baja: $C_s = \sigma_{sc} A_{sc}$

Resultan gaya tekan beton: $C_c = 0,85 f'_c b a$

Penampang berisi baja nonprategang dan tendon ikat prategang

Tegangan pada tulangan baja tekan ditentukan dari geometri diagram regangan linier diperlihatkan pada Figure 4.6b. Besarnya regangan baja tekan adalah

$$\varepsilon_{sc} = \frac{0,003(c - d_c)}{c} \quad (4.12)$$

Jika $\varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_y$; di mana $\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ (baja non prategang), maka $\sigma_{sc} = \varepsilon_{sc} E_s$

Jika $\varepsilon_{sc} > \varepsilon_y$ maka $\sigma_{sc} = f_y$

Gaya tarik resultan pada Figure 4.6d terdiri dari

- komponen prategang $T_p = \sigma_{pu} A_p$
- komponen nonprategang $T_s = \sigma_{st} A_{st}$

Tegangan baja nonprategang ditentukan dari regangan *ultimate* (ε_{st}), yaitu:

$$\varepsilon_{st} = \frac{0,003(d_o - c)}{c} \quad (4.13)$$

- Jika $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_y$, maka $\sigma_{st} = \varepsilon_{st} E_s$
- Jika $\varepsilon_{st} > \varepsilon_y$, maka $\sigma_{st} = f_y$
- Untuk menghitung tinggi sumbu netral *ultimate* (c), diperlukan prosedur *trial and error* yang sama dengan subbab 4.3.4 (Contoh 4.1).
- Beberapa nilai c dicoba sampai keseimbangan horisontal terpenuhi:

$$T_p + T_s = C_c + C_s \quad (4.14)$$

- Fungsi tulangan baja tekan adalah untuk menambah daktilitas, maka mayoritas balok bertulangan ganda termasuk kategori *under-reinforced* (baja tulangan nonprategang leleh saat kondisi *ultimate*).
- Kondisi baja tulangan tekan mencapai leleh atau tidak bergantung pada luas tulangan baja tekan nonprategang (A_{sc}) dan jaraknya dari permukaan tekan (d_c).

ILMU ALAT PENGABIAN

Diasumsikan di awal bahwa tulangan baja nonprategang tekan dan tarik mencapai kondisi leleh, maka

$$C_s = f_y A_{sc} \text{ dan } T_s = f_y A_{st}$$

Dari persamaan 4.14:

$$C_c = T_p + T_s - C_s$$
$$0,85f'_c ba = \sigma_{pu} A_p + f_y (A_{st} - A_{sc})$$

maka

$$\sigma_{pu} = \frac{0,85f'_c ba - f_y (A_{st} - A_{sc})}{A_p} \quad (4.15)$$

Jika nilai σ_{pu} (dari persamaan 4.15) dan ε_{pu} (dari persamaan 4.11) memenuhi hubungan tegangan-regangan baja prategang, nilai c dapat ditentukan. Regangan baja nonprategang harus dicek apakah sudah leleh. Jika baja tekan belum leleh, gaya tekan C_s terlalu besar dan nilai c yang benar lebih besar dari nilai c hasil perhitungan. Tegangan baja tekan pada persamaan 4.15 harus diambil sebesar $\varepsilon_{sc} E_s$, bukan f_y .

Iterasi lebih lanjut mungkin diperlukan untuk menentukan nilai c yang benar dan gaya-gaya dalam terkait, yaitu C_c , C_s , T_p , dan T_s .

Dengan persamaan horisontal yang terpenuhi, momen *ultimate* penampang dapat ditentukan dengan mengambil momen akibat gaya dalam di titik acuan manapun pada penampang. Dengan mengambil titik acuan momen di level tulangan baja tarik nonprategang, maka

$$M_u = C_c l_c + C_s l_s - T_p l_p \quad (4.16)$$

dengan

C_c : gaya tekan beton (+)

C_s : gaya teka baja nonprategang (+)

Untuk penampang berbentuk persegi empat pada Figure 4.6a dan d (halaman 19), lengan momen setiap gaya dalam adalah

$$l_c = d_o - \frac{a}{2}; l_s = d_o - d_c; \text{ dan } l_p = d_o - d_p$$

Kelengkungan *ultimate* diperoleh dari persamaan 4.5.

Kelengkungan minimum (*minimum curvature*) adalah kemiringan diagram regangan minimum:

$$\varphi_{u \min} = \frac{0,0075}{d} \quad (4.17)$$

yang sama dengan persamaan 4.6 kecuali bahwa d_p (jarak serat tekan terluar ke baja prategang) digantikan dengan d (jarak dari serat tekan terluar ke gaya resultan tarik, T).

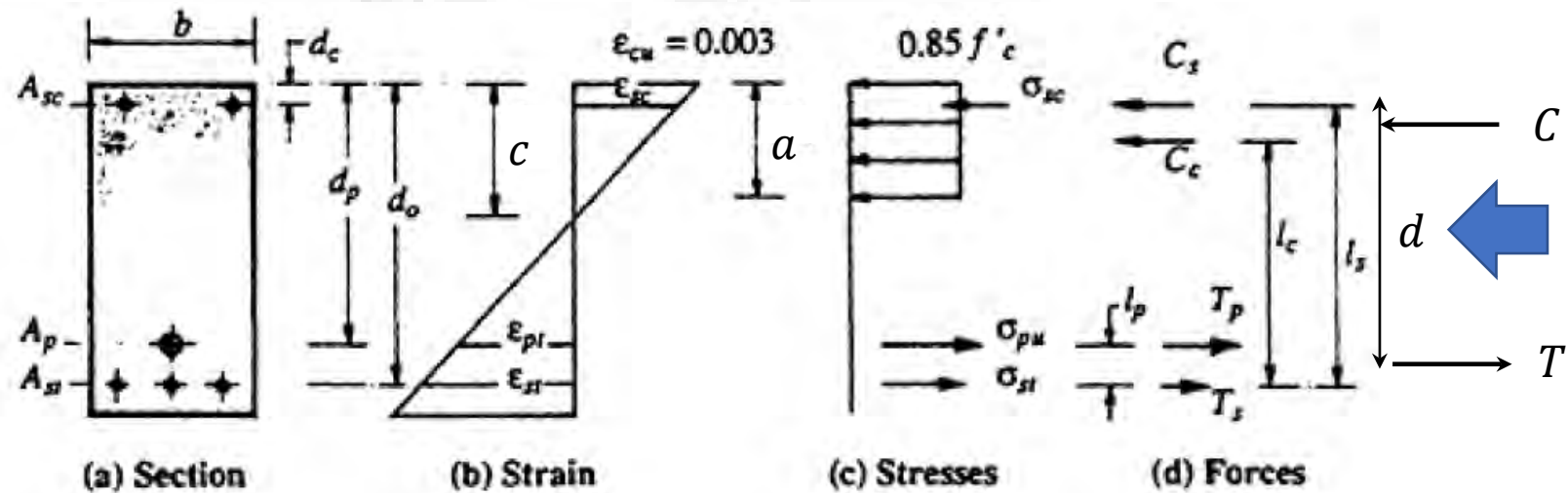


Figure 4.6 Doubly reinforced section at ultimate.

$$C = C_s + C_c \text{ dan } T = T_p + T_s$$

Contoh soal 4.2: Ada tendon prategang dan baja tarik nonprategang, tidak ada baja tekan nonprategang

Penampang pada contoh soal 4.1 diperlihatkan pada Figure 4.4. **Tiga batang baja nonprategang** berdiameter 24 mm ($A_{st} = 1350 \text{ mm}^2$) ditambahkan di **zona tarik**. Jarak dari serat tekan atas ke baja tulangan tarik nonprategang adalah $d_o = 690 \text{ mm}$. Momen *ultimate* (M_u) penampang akan dihitung. Tegangan leleh baja nonprategang $f_y = 400 \text{ MPa}$ dan semua data material lain sama dengan contoh soal 4.1. Regangan baja prategang *ultimate* adalah seperti yang telah dihitung pada contoh soal 4.1:

$$\varepsilon_{pu} = \varepsilon_{pe} + \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{pt} = 0,00655 + 0,00040 + 0,003 \left(\frac{650 - c}{c} \right)$$

Besarnya gaya tekan beton C_c adalah

$$C_c = 0,85 f'_c b a = 8340 c$$

Dari persamaan 4.13, baja tulangan nonprategang saat leleh (yaitu $\varepsilon_{st} \geq \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0,002$) menyebabkan jarak sumbu netral $c \leq 0,6 d_o (= 414 \text{ mm})$. Jika $\sigma_{st} = f_y$ (asumsi), gaya tarik resultan diberikan dengan persamaan:

$$T = T_p + T_s = \sigma_{pu} A_p + f_y A_{st} = 1000 \sigma_{pu} + (400 \times 1350) = 1000 (\sigma_{pu} + 540)$$

Keseimbangan horisontal berarti bahwa $C_c = T$ maka $1000 (\sigma_{pu} + 540) = 8340 c$ atau

$$\sigma_{pu} = 8,34c - 540$$

Nilai-nilai c yang dicoba dapat diseleksi dan nilai terkait regangan dan tegangan *ultimate* baja prategang (ϵ_{pu} dan σ_{pu}) diplot pada kurva tegangan-regangan seperti yang diperlihatkan pada Figure 4.7.

Trial c (mm)	ϵ_{pu}	σ_{pu} (MPa)	Point Plotted on Figure 4.7
270	0.0108	1712	(4)
290	0.0103	1879	(5)
277	0.0106	1770	(6)

Karena titik 6 berada relatif dekat dengan kurva tegangan-regangan tendon, nilai c yang benar adalah 277 mm. Dari persamaan 4.5, kelengkungan *ultimate* adalah

$$\varphi_u = \frac{0,003}{277} = 10,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

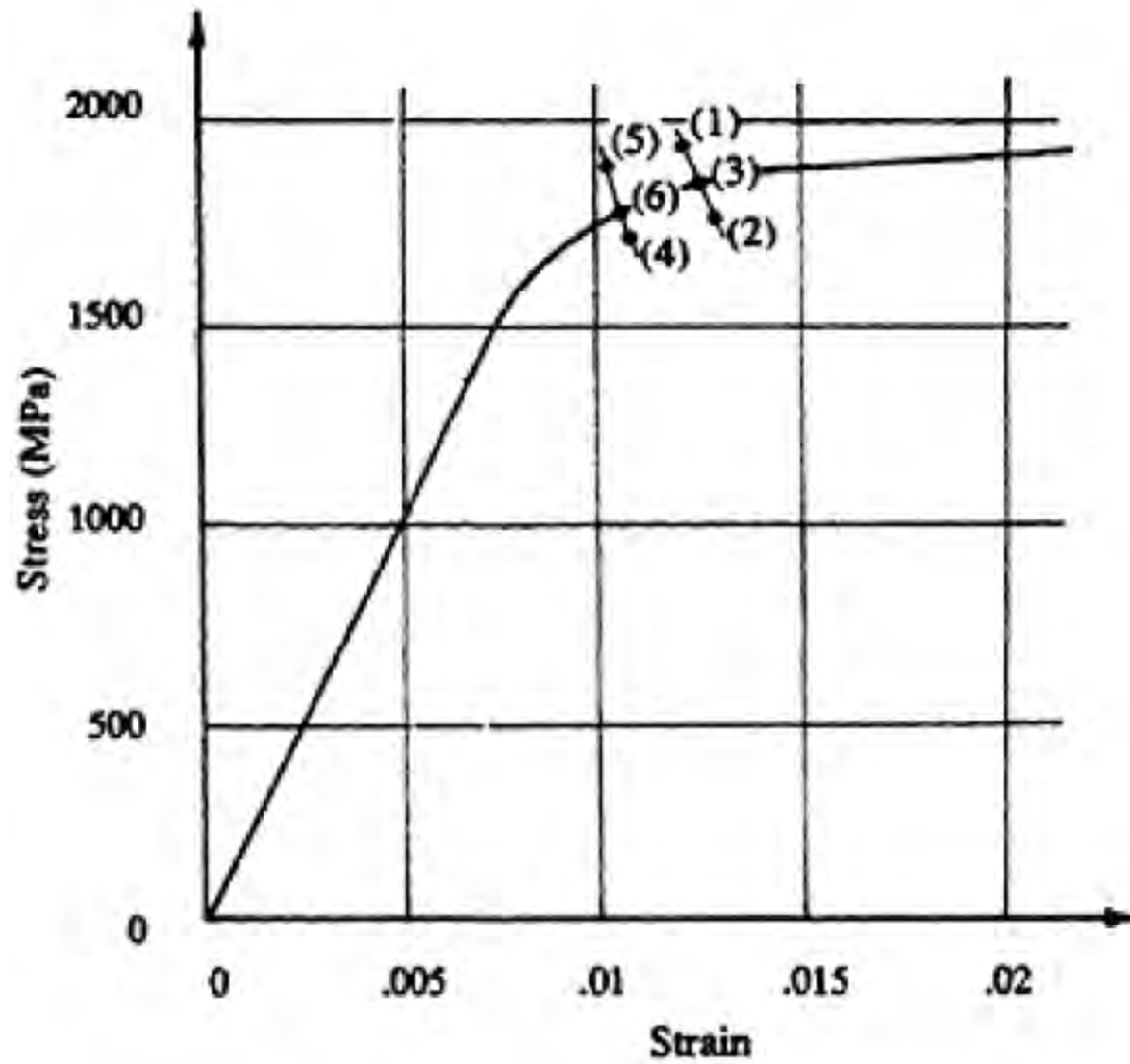


Figure 4.7 Stress-strain curve for strand ([Example 4.2](#)).

Nilai $c \ll 0,6d_o$ ($= 414 \text{ mm}$) maka baja nonprategang telah leleh, sesuai dengan asumsi.

Jarak dari serat tekan terluar ke gaya resultan baja tarik adalah (lihat gambar halaman 24):

$$d = \frac{\sigma_{pu}A_p d_p + f_y A_{st} d_o}{\sigma_{pu}A_p + f_y A_{st}} = 659 \text{ mm}$$

Kelengkungan minimum yang diperlukan untuk menentukan daktilitas diperoleh dari persamaan 4.17:

$$\varphi_{u \text{ min}} = \frac{0,0075}{d} = \frac{0,0075}{659} = 11,4 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} > \varphi_u$$

Penampang ini non-daktail akibat adanya baja prategang. Untuk meningkatkan daktilitas dan kelengkungan *ultimate*, diperlukan tulangan tekan non-prategang, setidaknya ke tingkat yang disyaratkan oleh persamaan 4.17.

Pada kondisi *ultimate*, gaya tekan pada beton adalah $C_c = 8340 \text{ c} = 2310 \text{ kN}$ dan gaya tarik pada tendon adalah $T_p = \sigma_{pu}A_p = 1770 \text{ kN}$. **Tidak ada tulangan tekan**, maka $C_s = A_{sc}f_y = 0$.

Momen *ultimate* dihitung dari persamaan 4.16:

$$\begin{aligned} M_u &= C_c l_c + C_s l_s - T_p l_p = C_c \left(d_o - \frac{a}{2} \right) + C_s (d_o - d_c) - T_p (d_o - d_p) \\ &= C_c \left(d_o - \frac{\beta_1 c}{2} \right) - T_p (d_o - d_p) = 2310 \left(690 - \frac{0,801 \times 277}{2} \right) - 1770 (690 - 650) = 1267 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Contoh soal 4.3: Ada tendon prategang, baja tarik dan tekan nonprategang

Pertimbangkan efek pada kekuatan dan daktilitas akibat **penambahan dua batang baja nonprategang** berdiameter 24 mm di **zona tekan** pada Contoh 4.2. Rincian penampang ditunjukkan pada Figure 4.8, bersama dengan distribusi tegangan dan regangan kondisi *ultimate*. Semua data seperti yang ditentukan dalam Contoh 4.1 dan 4.2.

Dari Contoh 4.2, regangan *ultimate* pada tendon adalah

$$\epsilon_{pu} = \epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} + \epsilon_{pt} = 0,00655 + 0,00040 + 0,003 \left(\frac{650 - c}{c} \right)$$

Dan regangan tarik baja nonprategang $> \epsilon_y$

Regangan baja tekan *ultimate* berdasarkan persamaan 4.12:

$$\epsilon_{sc} = \frac{0,003(c - d_c)}{c} = \frac{0,003(c - 60)}{c}$$

Tegangan baja tekan dapat diperoleh dari ϵ_{sc} untuk semua nilai c . Dengan keseimbangan horisontal $C = T$, maka diperoleh persamaan σ_{pu} (persamaan 4.15). Jika baja tekan diasumsikan leleh, persamaan 4.15 menghasilkan

$$\sigma_{pu} = \frac{0,85f'_c ba - f_y(A_{st} - A_{sc})}{A_p}$$

$$= \frac{(0,85 \times 35 \times 350 \times 0,801 c) - [400 \times (1350 - 900)]}{1000} = 8,34c - 180$$

Catatan: $C = C_s + C_c$ dan $T = T_p + T_s$

Nilai ϵ_{pu} dan σ_{pu} untuk nilai uji coba c ditabulasikan di bawah ini dan diplot sebagai titik (7) - (9) pada Gambar 4.9.

Trial c	ϵ_{pu}	ϵ_{sc}	σ_{pu} (MPa)	Point plotted on Figure 4.9
250	0.0114	$> \epsilon_y$	1905	(7)
230	0.0120	$> \epsilon_y$	1738	(8)
239	0.0117	$> \epsilon_y$	1813	(9)

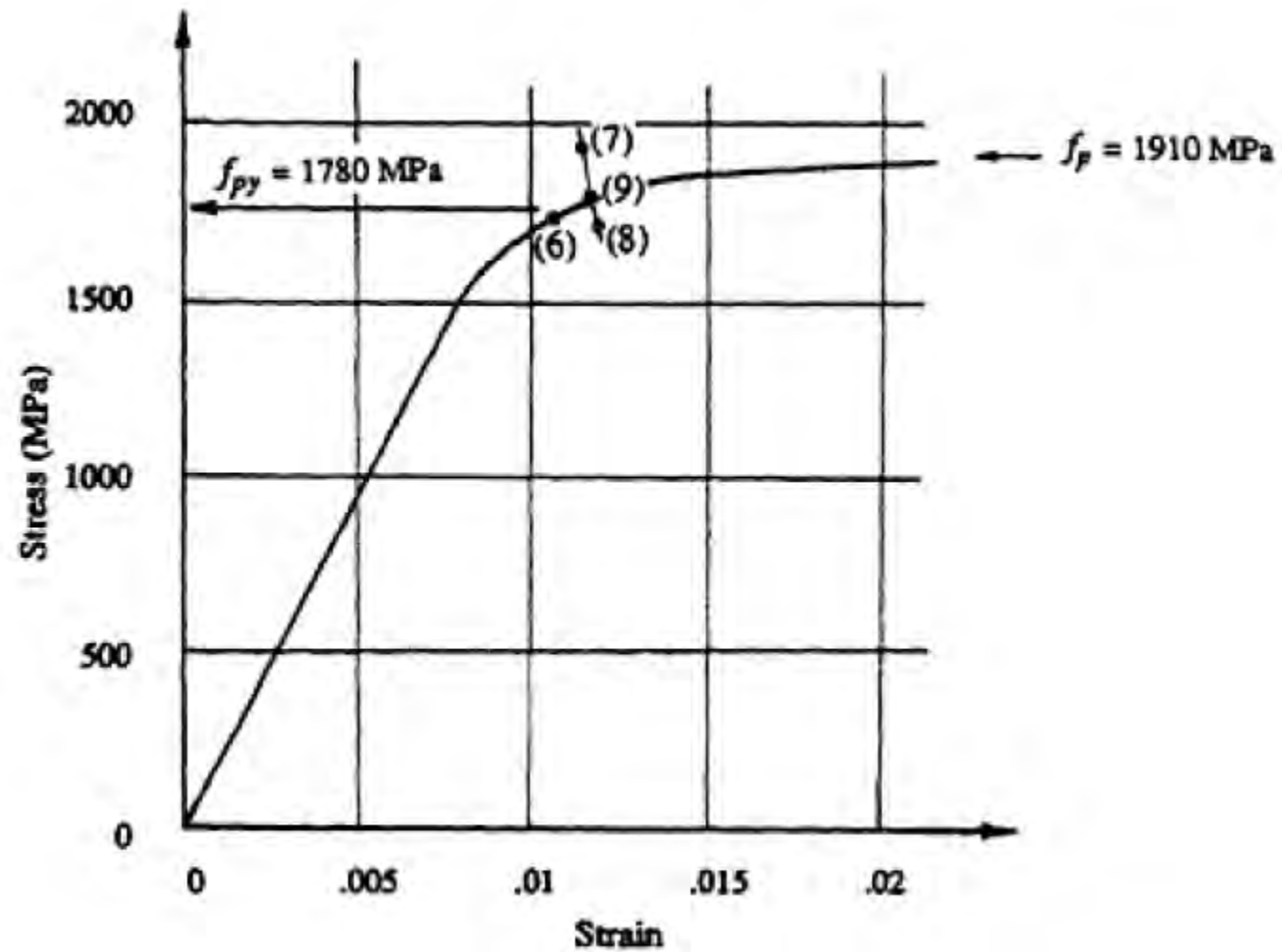


Figure 4.9 Stress–strain curve for strand ([Example 4.3](#)).

Dari Figure 4.9, titik yang sesuai dengan $c = 239 \text{ mm}$ terletak pada kurva tegangan-regangan aktual dan karenanya merupakan solusi yang tepat. Juga terlihat pada Figure 4.9 bahwa tegangan dan regangan pada baja prategang *ultimate* meningkat akibat adanya tulangan tekan [dari titik (6) ke titik (9)] dan jarak serat tekan terluar ke sumbu netral (c) berkurang. Diperoleh: $\sigma_{pu} = 8,34c - 180$ (halaman 30) $= 8,34 \times 239 - 180 = 1813,26 \text{ MPa}$

Kelengkungan *ultimate* diperoleh dari Persamaan 4.5:

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0,003}{c} = \frac{0,003}{239} = 12,6 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

yang mewakili peningkatan 12% kelengkungan akhir yang disebabkan oleh tulangan tekan.

Jarak d untuk gaya tarik resultan T ($= T_p + T_{st}$) tetap pada 659 mm (halaman 28).

Besarnya gaya resultan pada penampang adalah

$$C_c = 0,85f'_c b a = 0,85f'_c b \beta_1 c = 0,85 \times 35 \times 350 \times 0,801 \times 239 = 1993359 \text{ N} = 1993,36 \text{ kN}$$

$$C_s = f_y A_{sc} = 400 \times 900 = 360000 \text{ N} = 360 \text{ kN}$$

$$T_s = f_y A_{st} = 400 \times 1350 = 540000 = 540 \text{ kN}$$

$$T_p = \sigma_{pu} A_p = 1813,26 \times 1000 = 1813260 \text{ N} = 1813 \text{ kN}.$$

Momen *ultimate* dihitung dengan persamaan 4.16, ada tulangan baja tekan dan tarik nonprategang dan tendon prategang. Dengan sumbu momen di level baja tarik nonprategang, maka

$$\begin{aligned}
 M_u &= C_c l_c + C_s l_s - T_p l_p = C_c \left(d_o - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + C_s (d_o - d_c) - T_p (d_o - d_p) \\
 &= 1993358.59 \left(690 - \frac{0,801 \times 239}{2} \right) + 360000(690 - 60) - 1813358.59(690 - 650) \\
 &= 1.184.614.140 + 226.800.000 - 72.534.343,6 = 1.338.879.796 \text{ N.mm} \\
 &= 1338,88 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

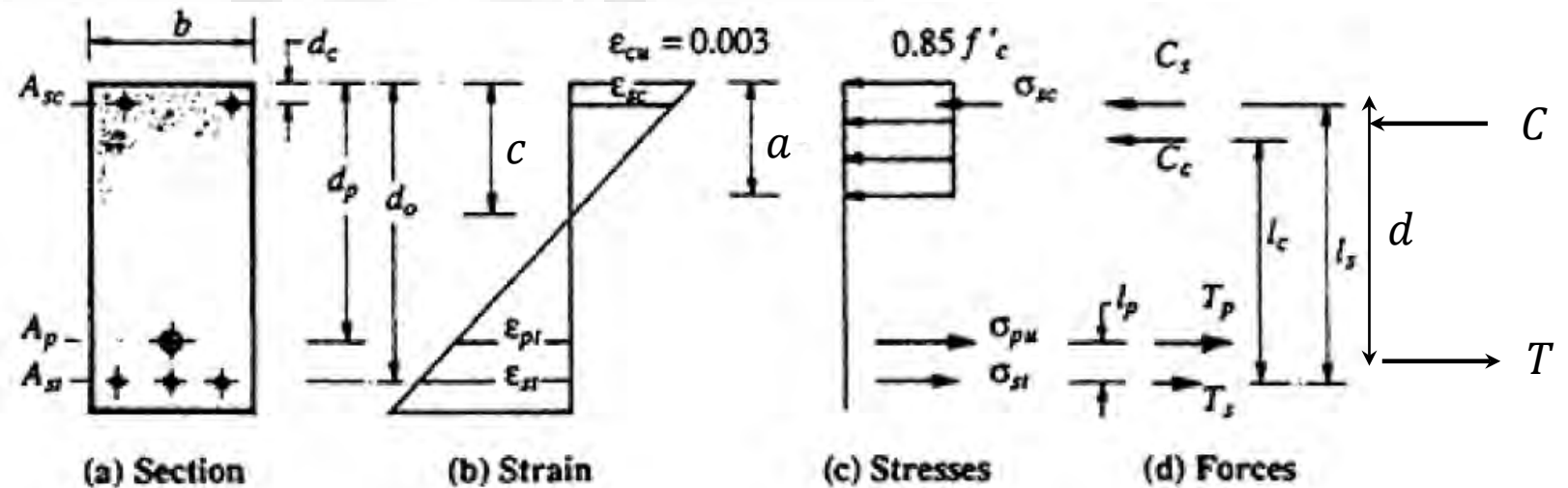


Figure 4.6 Doubly reinforced section at ultimate.

$$C = C_s + C_c \text{ dan } T = T_p + T_s$$

$M_u = 1338,88 \text{ kN.m}$ merupakan peningkatan kekuatan 5,67%. Secara umum, untuk penampang non-daktail, penambahan tulangan tekan menyebabkan peningkatan yang signifikan pada kelengkungan kondisi *ultimate* (yaitu peningkatan daktilitas yang signifikan) dan peningkatan kekuatan yang kurang signifikan namun cukup berarti.

Contoh 4.1. hanya ada tendon prategang:

$M_u = 1030 \text{ kN.m}$ (naik 30% menjadi $1338,88 \text{ kN.m}$)

Contoh 4.2. ada tulangan baja tarik nonprategang dan tendon prategang:

$M_u = 1267 \text{ kN.m}$ (naik 5,67% menjadi $1338,88 \text{ kN.m}$)

Referensi

- Gibert, R.I. dan Mickleborough, N.C., (2005): *Design of Prestressed Concrete*, Spon Press-Taylor and Francis Group, London and New York.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), (2019): *SNI 2847:2019 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.

