

# Kekuatan Penampang Beton Prategang Terhadap Lentur

## 1 JENIS-JENIS KERUNTUHAN AKIBAT LENTUR

Apabila batang beton prategang menerima beban lentur, maka mungkin timbul tipe-tipe keruntuhan akibat lentur yang berbeza-beza pada penampang kritis yang tergantung pada parameter pentaruhan yang pokok, seperti persentase tulangan pada penampang tersebut, tingkat kerekatan antara tendon dan beton, kekuatan tekan beton, dan kekuatan tarik ultimit tendon. Dalam tahap setelah retakan, perilaku batang beton prategang lebih membolehkan batang beton bertulang dan teori-teori yang dipakai untuk menghitung kekuatan terhadap lentur pada penampang beton bertulang dapat digunakan untuk penampang beton prategang.

Berbagai tipe keruntuhan akibat lentur yang dijumpai pada batang beton prategang ini dalam kaitannya dengan rekomendasi berbagai peraturan pelaksanaan.

### 1. Patahnya Baja dalam Daerah Tarik

Keruntuhan seketika suatu batang prategang tanpa peringatan apa pun pada umumnya disebabkan oleh patahnya baja dalam daerah tarik. Tipe keruntuhan ini akan segera terjadi apabila persentase baja yang disediakan pada penampang yang bersangkutan adalah sedemikian rendahnya sehingga kalau beton tersebut retak dalam daerah tarik, bajanya tidak mampu menahan tegangan tarik tambahan yang ditransfer kepadanya oleh beton yang retak. Tipe keruntuhan ini dapat dicegah dengan memberikan suatu persentase baja minimum tertentu pada potongan melintangnya.

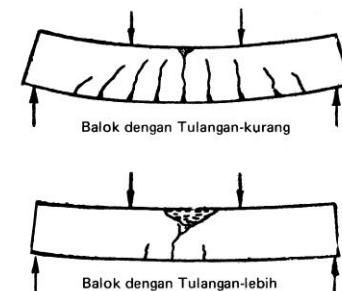
Peraturan standar India menetapkan suatu tulangan memanjang minimum sebesar 0,2 persen luas potongan melintang untuk unit pratarik yang penampangnya kecil. Bila digunakan tulangan berulir dengan kekuatan leleh tinggi, persentase tulangan minimum tersebut dikurangi menjadi 0,15 persen.

Sebagai perbandingan, peraturan Inggris menetapkan suatu luas baja minimum sebesar 0,15 persen luas penampang melintang, sedangkan peraturan Amerika menentukan bahwa luas minimum tulangan yang terekat tidak boleh kurang dari 0,004 kali luas bagian penampang melintang antara bidang tarik akibat lentur dan titik berat penampang beton bruto.

### 2. Keruntuhan pada Penampang dengan Tulangan-Kurang

Kalau potongan melintang diperlengkapi dengan jumlah baja yang lebih besar daripada yang ditetapkan minimum dalam kasus 1, maka keruntuhannya digolongkan oleh perpanjangan baja yang berlebihan yang diikuti dengan pecahnya beton. Kalau beban lentur bertambah, perpanjangan yang berlebihan pada baja akan menaikkan sumbu netral menjadi lebih dekat dengan bidang tekan pada penampang kritis.

Batang yang hampir runtuh akibat berkurangnya daerah tekan secara berangsur-angsur akan menunjukkan lendutan yang besar dan retak-retak yang timbul pada sofif (bidang tepi bawah) dan berkembang ke arah bidang tekan. Apabila luas beton dalam daerah tekan tidak cukup untuk menahan resultan gaya tekan internal, maka keruntuhan akibat lentur ultimit pada batang tersebut berlangsung melalui pecahnya beton. Lendutan yang besar serta retak yang lebar merupakan ciri-ciri khas penampang beton dengan tulangan-kurang (*under-reinforced*) pada saat runtuh (Gambar 7.1). Tipe perlakuan seperti ini pada umumnya disukai karena terdapat cukup peringatan sebelum terjadinya keruntuhan. Dengan demikian, penampang beton umumnya didesain dengan tulangan-kurang yang menjadi lebih penting dalam hal struktur statis tak-tentu. Umumnya ditetapkan dalam berbagai peraturan suatu batas-atas untuk luas baja maksimum untuk beton dengan tulangan-kurang.



Gambar 7.1 Cara Keruntuhan Lentur pada Balok Prategang.

### 3. Keruntuhan pada Penampang Beton dengan Tulangan-Lebih

Apabila indeks tulangan efektif, yang dinyatakan dalam persentase tulangan, kekuatan tekan beton, dan kekuatan tarik baja, melebihi suatu batas nilai-nilai tertentu, maka penampang tersebut dikatakan memiliki tulangan-lebih (*over reinforced*). Pada umumnya batang dengan tulangan-lebih akan runtuh bila beton pecah secara mendadak, dan keruntuhan tersebut ditunjukkan dengan lendutan kecil dan retakan halus (Gambar 7.1). Apabila bajanya cukup besar, maka tegangan-tegangan yang timbul pada baja pada waktu keruntuhan batang mungkin tidak mencapai kekuatan tariknya dan dalam banyak hal mungkin berada dalam tegangan-ujji tendon.

Pada batang beton struktural, terjadinya keruntuhan secara mendadak tanpa peringatan apapun dalam bentuk lendutan yang berlebihan dan retak-retak yang melebar tidak diinginkan, dan akibatnya pemakaian penampang yang mempunyai tulangan-lebih tidak di-anjurkan. Jumlah tulangan yang dipakai dalam praktik sebaiknya tidak melebihi yang diperlukan untuk suatu penampang yang seimbang. Dalam hubungan ini, hampir semua peraturan mengikuti suatu pendekatan konservatif di dalam merumuskan prosedur evaluasi untuk perhitungan kekuatan terhadap lentur pada penampang beton dengan tulangan-lebih.

Redistribusi momen-momen pada suatu struktur statis tak-tentu tergantung pada kapasitas rotasi penampang kritis batang di bawah suatu sistem beban tertentu. Pemakaian penampang beton dengan tulangan-lebih dalam struktur semacam itu akan membatasi kapasitas rotasi penampangnya dan dengan demikian mempengaruhi beban ultimit pada struktur.

#### 4. Cara-cara Keruntuhan Lainnya

Batang beton prategang yang menerima beban transversal mungkin mengalami keruntuhan akibat geseran sebelum kekuatan terhadap lenturnya tercapai sepenuhnya, kalau batang beton tersebut tidak didesain terhadap geseran secara cukup. Retak akibat geser pada badan mungkin timbul kalau tegangan-tegangan utamanya terlalu besar, dan kalau dipakai badan yang tipis, mungkin keruntuhan dapat terjadi akibat pecahnya badan. Dalam hal batang prateark, kerusakan rekatkan antara baja dan beton yang mengelilinginya agaknya disebabkan oleh panjang penyuluran yang tidak cukup pada ujung-ujung batang. Pada batang pascatarik, kerusakan angkur dapat terjadi kalau blok ujung tidak didesain sebaik-baiknya untuk menahan gaya-gaya tarik transversal.

## 7.2 METODE KOMPATIBILITAS REGANGAN

Metode yang setepat-tepatnya untuk memperhitungkan batang beton prategang terhadap lentur didasarkan atas kompatibilitas regangan dan keseimbangan gaya pada penampang yang bersangkutan<sup>1</sup>. Teori dasarnya dapat diterapkan pada semua penampang beton struktural, baik bertulang maupun prategang, dan pada umumnya dibuat anggapan-anggapan sebagai berikut:

1. Distribusi tegangan dalam daerah tekan beton dapat ditentukan dengan menggunakan koefisien-koeffisien dari mana tegangan tekan rata-rata dan kedudukan pusat tekanan dapat ditaksir.
2. Distribusi regangan beton adalah linear (penampang datar yang tegak lurus terhadap sumbu tetap datar setelah melentur).
3. Beton tidak menahan tarikan.
4. Regangan tekan maksimum pada saat kerusakan mencapai suatu nilai tertentu.

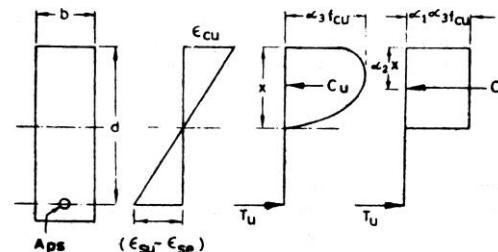
Tegangan tekan akibat lentur di dalam daerah tekan hampir mendekati kurva tegangan-regangan beton. Besarnya tegangan maksimum dan rata-rata serta kedudukan pusat tekanan dapat ditunjukkan oleh tiga parameter,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , dan  $\alpha_3$ , yang didasarkan atas usaha Hognestad dan kawan-kawan<sup>2</sup> dan Rusch<sup>3,4</sup>. Gambar 7.2 memperlihatkan distribusi tegangan dan regangan pada tahap runtuh untuk sebuah penampang persegi panjang dengan baja di dalam daerah tarik. Parameter-parameternya tidak konstan tetapi tergantung pada kekuatan tekan beton. Penelitian-penelitian telah menunjukkan bahwa nilai  $\alpha_1$  dan  $\alpha_3$  bervariasi antara 0,6 dan 0,8, dan  $\alpha_2$  antara 0,35 dan 0,5, untuk kekuatan tekan kubus yang berkisar antara 70–15 N/mm<sup>2</sup>. Nilai-nilai parameter yang lebih kecil pada umumnya berkaitan dengan beton dengan kekuatan tekan lebih tinggi. Regangan tekan,  $\epsilon_{cu}$ , pada beton pada tahap runtuh bervariasi antara 0,0037 sampai 0,0028 untuk beton dengan kekuatan kubus yang berkisar antara 15–70 N/mm<sup>2</sup>.

Beton berkekuatan tinggi selalu dipakai untuk elemen beton prategang dan nilai parameter-parameter ini yang sesuai untuk perhitungan dapat dianggap sebagai

$$\epsilon_{cu} = 0,0035$$

$$\alpha_1 \alpha_3 = 0,6$$

$$\alpha_2 = 0,5$$



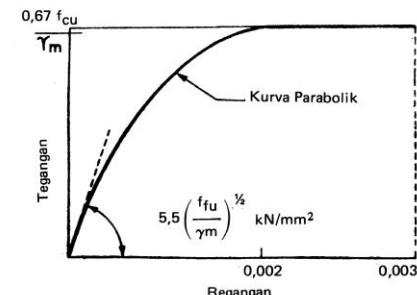
Gambar 7.2 Kondisi-kondisi Tegangan-Regangan pada saat Runtuh.

Perhatikan Gambar 7.2, tekanan total =  $\alpha_1 \alpha_3 f_{cu} bx = 0,6 f_{cu} bx$   
tarikan total =  $A_{ps} f_{pb}$ .

$$M_u = A_{ps} f_{pb} (d - 0,5 x)$$

Suatu pengetahuan akan karakteristik tegangan-regangan baja juga perlu untuk perhitungan kekuatan terhadap lentur dengan memakai metode kompatibilitas regangan. Dalam hal tidak terdapat kurva tegangan-regangan yang sebenarnya dari beton dan baja, peraturan Inggris dan India menganjurkan bentuk-bentuk ideal untuk karakteristik tegangan-regangan bahan-bahan tersebut seperti ditunjukkan dalam Gambar 7.3 untuk beton dan Gambar 7.4 untuk tendon dan baja tulangan. Kurva-kurva ideal tersebut berkaitan dengan kekuatan rencana bahan tadi, yang diperoleh dengan membagi kekuatan karakteristik dengan faktor keamanan parsial untuk bahan-bahan tersebut (lihat Bab 11). Langkah-langkah utama yang harus diikuti dalam metode ini adalah:

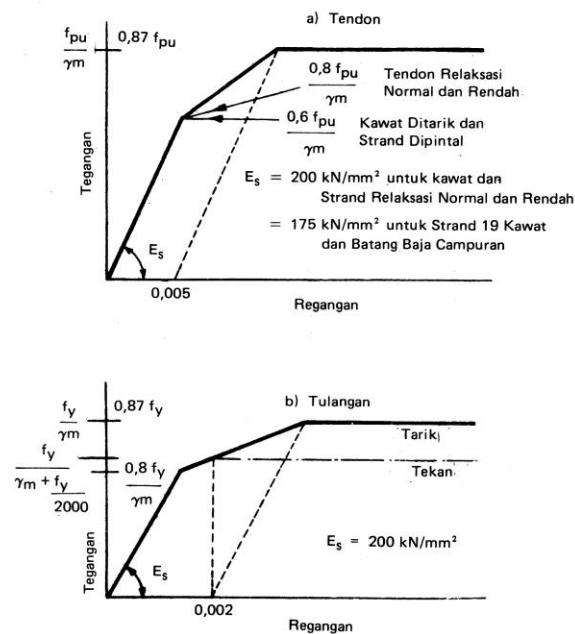
1. Hitung regangan efektif  $\epsilon_{se}$  pada baja akibat prategang, dengan memperhitungkan semua kehilangan, dari kurva tegangan-regangan.
2. Misalkan suatu nilai coba-coba untuk kedalaman sumbu netral  $x$  dan hitung  $\epsilon_{su} - \epsilon_{se}$  dari diagram regangan (dengan mengumpamakan  $\epsilon_{cu} = 0,0035$ , hitunglah nilai  $\epsilon_{su}$ ).
3. Dengan memakai kurva tegangan-regangan baja, tentukan nilai  $f_{pb}$  yang bersesuaian dengan  $\epsilon_{su}$ .



Gambar 7.3 Hubungan Tegangan-Regangan untuk Beton (Peraturan Inggris CP 110).

- Hitung tekanan dan tarikan total dengan memakai nilai-nilai parameter  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  dan  $\alpha_2$  yang sesuai ( $\alpha_1, \alpha_3 = 0,6$  dan  $\alpha_2 = 0,5$ ). Jika gaya tekan dan tarik sama besar, maka nilai  $x$  yang diasumsikan adalah benar. Jika tarikan lebih kecil dari tekanan, kurangi nilai  $x$ , dan jika tarikan lebih besar dari tekanan, perbesar  $x$  dan ulangi langkah 2 sampai sedemikian rupa sehingga suatu kesesuaian yang baik tercapai.
- Evaluasi momen ultimit  $M_u$  dengan memakai persamaan

$$M_u = A_{ps} f_{pb} (d - 0,5 x)$$



Gambar 7.4 Hubungan Tegangan-Regangan untuk Tendon dan Baja Tulangan  
(Peraturan Inggris CP 110).

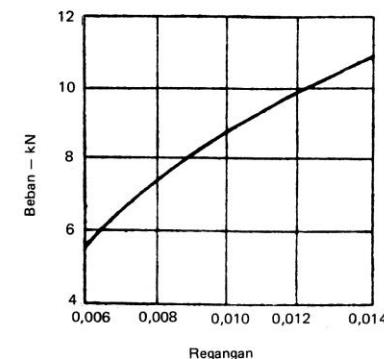
Pada umumnya keseimbangan gaya dapat dicapai dalam dua atau tiga kali coba-coba. Metode kompatibilitas regangan sangat berguna untuk menghitung kekuatan ultimit penampang dengan tulangan-lebih di mana tegangan-regangan pada baja tidak mencapai nilai kekuatan ultimit pada saat runtuh. Suatu cara grafis metode kompatibilitas regangan telah dianjurkan oleh Morsch<sup>6</sup> di mana keruntuhan daerah tekan diasumsikan pada saat serat tekan ekstrim mencapai suatu batas regangan sebesar 0,2 persen. Sehubungan dengan itu untuk penampang dengan tulang-kurang, keruntuhan baja prategang dianggap terjadi pada suatu regangan tarik maksimum sebesar 0,5 persen. Namun metode tersebut dapat sangat disederhanakan untuk penampang dengan tulangan-kurang, di mana tegangan pada baja tarik pada tahap runtuh lebih kurang sama dengan kekuatan tarik ultimit tendon.

Dengan memperhitungkan aspek ini, banyak peraturan telah menganjurkan prosedur-prosedur yang disederhanakan untuk menghitung kekuatan terhadap lentur penampang beton yang diperkuat dengan baja bermutu tinggi dalam daerah tarik.

Pemakajian metode kompatibilitas regangan, yang pada umumnya dapat diterapkan pada penampang dengan tulangan kurang maupun lebih, digambarkan dengan contoh-contoh berikut.

#### CONTOH 7.1

Sebuah balok beton pratarik dengan penampang persegi panjang, lebar 62,5 mm dan tinggi 140 mm, diberi prategang dengan 6 kawat berdiameter 2,5 mm yang terletak pada suatu eksentrisitas sebesar 42,5 mm. Gaya awal pada masing-masing kawat sama dengan 6,8 kN. Kehilangan regangan pada kawat-kawat akibat perpendekan elastis, rangkak, dan susut beton diperkirakan sama dengan 0,0012 satuan. Kekuatan kubus beton sama dengan  $41,5 \text{ N/mm}^2$ . Dengan mengetahui kurva beban-regangan dari kawat baja 2,5 mm (Gambar 7.5), hitunglah kekuatan terhadap lentur penampang tersebut dengan memakai metode kompatibilitas regangan.



Gambar 7.5 Kurva Beban-Regangan untuk Kawat 2,5 mm.

$$\begin{aligned} \text{Regangan akibat beban } 6,8 \text{ kN pada kawat} &= 0,0073 \\ \text{Regangan efektif pada baja setelah kehilangan} &= (0,0073 - 0,0012) \\ \epsilon_{se} &= 0,0061 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Percobaan Pertama:} \quad &\text{Misalkan } x = 47,5 \text{ mm, } \epsilon_{eu} = 0,0035 \\ &\text{Dari diagram regangan } (\epsilon_{su} - \epsilon_{se}) = 0,0046 \text{ (Lihat Gambar 7.2)} \\ \text{Jadi} \quad &\epsilon_{su} = (0,0046 + 0,0061) = 0,0107 \\ &\text{Gaya yang bersesuaian pada tiap kawat} = 9,10 \text{ kN} \\ \text{Jadi} \quad &\text{Tarikan} = (6 \times 9,10) = 54,60 \text{ kN} \\ &\text{Tekanan} = (0,6 \times 41,5 \times 62,5 \times 47,5) = 74000 \text{ N} = 74 \text{ kN} \\ &\text{Oleh karena tarikan kurang dari tekanan, } x \text{ dikurangi.} \end{aligned}$$

Percobaan Kedua: Misalkan  $x = 40$  mm,  $(\epsilon_{su} - \epsilon_{se}) = 0,006$

$$\text{Jadi } \epsilon_{su} = (0,006 + 0,0061) = 0,0121$$

Gaya yang bersesuaian pada tiap kawat = 10 kN

$$\text{Tarikan} = (6 \times 10) = 60 \text{ kN}$$

$$\text{Tekanan} = (0,6 \times 41,5 \times 62,5 \times 40) = 62000 \text{ N} = 62 \text{ kN}$$

Oleh karena tarikan hampir sama dengan tekanan, maka telah diperoleh kompatibilitas regangan.

$$\begin{aligned} M_u &= A_{ps} f_{pb} (d - 0,5 x) = 60 \times 10^3 (112,5 - 0,5 \times 40) \\ &= 5,55 \times 10^6 \text{ N mm} = 5,55 \text{ kN m} \end{aligned}$$

#### CONTOH 7.2

Kalau jumlah kawat pada balok dalam Contoh 7.1 ditambah menjadi 12, hitunglah kekuatan terhadap lentur penampang tersebut.

Percobaan Pertama: Misalkan  $x = 60$  mm

$$(\epsilon_{su} - \epsilon_{se}) = 0,0029$$

$$\text{Jadi } \epsilon_{su} = (0,0029 + 0,0061) = 0,009$$

Gaya pada setiap kawat = 8 kN

$$\text{Tarikan} = (12 \times 8) = 96 \text{ kN}$$

$$\text{Tekanan} = (0,6 \times 41,5 \times 62,5 \times 60) = 94000 \text{ N} = 94 \text{ kN}$$

Oleh karena tarikan hampir sama dengan tekanan, maka telah diperoleh kompatibilitas regangan.

$$\begin{aligned} M_u &= A_{ps} f_{pb} (d - 0,5 x) = 96 \times 10^3 (112,5 - 0,5 \times 60) \\ &= 79 \times 10^5 \text{ N mm} = 7,9 \text{ kN m} \end{aligned}$$

### 7.3 PROSEDUR-PROSEDUR PERATURAN YANG DISEDERHANAKAN

#### 7.3.1 Ketentuan-ketentuan dalam Peraturan India

Metode peraturan standar India (IS: 1343-1980) untuk menghitung kekuatan terhadap lentur penampang persegi panjang dan penampang dengan flens didasarkan pada blok tegangan persegi panjang dan parabolis yang luasnya sama dengan  $0,36 f_{ck} \cdot x$ , di mana

$f_{ck}$  = kekuatan kubus karakteristik

$x$  = kedalaman sumbu netral

Momen lawan pada penampang persegi panjang atau penampang T di mana sumbu netral terletak pada flens didapat dengan persamaan

$$M_u = f_{pu} \cdot A_p (d - 0,42 x_u)$$

di mana  $M_u$  = momen lawan ultimit

$f_{pu}$  = tegangan tarik pada tendon pada tahap keruntuhan balok

$f_p$  = kekuatan tarik karakteristik baja prategang

$f_{pa}$  = tekanan efektif pada tendon setelah kehilangan

$A_p$  = luas baja prategang

$d$  = tinggi efektif

$x_u$  = kedalaman sumbu netral

Nilai  $f_{pu}$  tergantung pada perbandingan tulangan efektif

$$\left( \frac{A_p \cdot f_p}{b \cdot d \cdot f_{ck}} \right)$$

Untuk batang pratarik dan batang pascatarik dengan rekanan efektif antara beton dan tendon, nilai-nilai  $f_{pu}$  dan  $x_u$  diberikan dalam Tabel 7.1. Prategang efektif  $f_{pe}$  setelah semua kehilangan tidak boleh kurang dari  $0,45 f_p$ . Untuk batang pascatarik dengan tendon tak-terekat, nilai-nilai  $f_{pu}$  dan  $x_u$  diberikan dalam Tabel 7.2.

TABEL 7.1 Kondisi pada Keadaan Batas Ultimit untuk Balok Persepsi dengan Tendon Pratarik atau dengan Tendon Pascatarik yang Memiliki Rekanan Efektif

$\left( \frac{A_p f_p}{b \cdot d \cdot f_{ck}} \right)$	Tegangan pada tendon sebagai bagian dari kekuatan rencana, $(f_{pu}/0,87 f_p)$		Perbandingan kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman titik berat tendon pada daerah tarik $(x_u/d)$	
	Pratarik	Pascatarik dengan rekanan efektif	Pratarik	Pascatarik dengan rekanan efektif
0,025	1,0	1,0	0,054	0,054
0,05	1,0	1,0	0,109	0,109
0,10	1,0	1,0	0,217	0,217
0,15	1,0	1,0	0,326	0,316
0,20	1,0	0,95	0,435	0,414
0,25	1,0	0,90	0,542	0,488
0,30	1,0	0,85	0,655	0,558
0,40	0,9	0,75	0,783	0,653

TABEL 7.2 Kondisi pada Keadaan Batas Ultimit untuk Balok Persegi Pascatarik yang Memiliki Tendon Tak-terekat

$\left( \frac{A_p f_{pe}}{b d f_{ck}} \right)$	Tegangan pada tendon sebagai bagian dari prategang efektif $(f_{pu}/f_{pe})$ untuk nilai-nilai $(L/D)$			Perbandingan kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tendon pada daerah tarik $(x_u/d)$ untuk nilai-nilai $(L/D)$		
	$\left( \frac{\text{Bentang efektif}}{\text{Tinggi efektif}} \right)$	$\left( \frac{\text{Bentang efektif}}{\text{Tinggi efektif}} \right)$	$\left( \frac{\text{Bentang efektif}}{\text{Tinggi efektif}} \right)$	30	20	10
0,025	1,23	1,34	1,45	0,10	0,10	0,10
0,05	1,21	1,32	1,45	0,16	0,16	0,18
0,10	1,18	1,26	1,45	0,30	0,32	0,36
0,15	1,14	1,20	1,36	0,44	0,46	0,52
0,20	1,11	1,16	1,27	0,56	0,58	0,64

Contoh-contoh ini melukiskan penerapan ketentuan-ketentuan peraturan IS: 1343-1980 yang direvisi berkenaan dengan kekuatan terhadap lentur ultimit penampang persegi dan penampang T. Untuk penampang dengan flens yang sumbu netralnya terletak di luar flens, momen lawan ditentukan dengan menggunakan asumsi-asumsi yang dibuat untuk blok tegangan sebagaimana ditetapkan dalam Peraturan I.S.

### CONTOH 7.3

Sebuah balok prategang pratarik yang memiliki penampang persegi panjang dengan lebar 150 mm dan tinggi 350 mm memiliki pelindung efektif setebal 50 mm. Bila  $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_p = 1600 \text{ N/mm}^2$ , dan  $A_p = 461 \text{ mm}^2$ , hitunglah kekuatan terhadap lentur ultimit penampang tersebut dengan menggunakan ketentuan-ketentuan peraturan IS: 1343.

$$\begin{aligned} \text{Diketahui } f_{ck} &= 40 \text{ N/mm}^2 & b &= 150 \text{ mm} \\ f_p &= 1600 \text{ N/mm}^2 & d &= 300 \text{ mm} \\ A_p &= 461 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Perbandingan tulangan efektif diberikan oleh

$$\left( \frac{f_p A_p}{f_{ck} b d} \right) = \left( \frac{1600 \times 461}{40 \times 150 \times 300} \right) = 0,40$$

Dari Tabel 7.1, nilai-nilai yang bersesuaian adalah

$$\left( \frac{f_{pu}}{0,87 f_p} \right) = 0,9 \quad \text{dan} \quad \left( \frac{x_u}{d} \right) = 0,783$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi } f_{pu} &= (0,87 \times 0,9 \times 1600) = 1253 \text{ N/mm}^2 \\ x_u &= (0,783 \times 300) = 234,9 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi } M_u &= f_{pu} A_p (d - 0,42 x_u) \\ &= 1253 \times 461 (300 - 0,42 \times 234,9) \\ &= 116 \times 10^6 \text{ N mm} \\ &= 116 \text{ kN m} \end{aligned}$$

### CONTOH 7.4

Sebuah penampang T pratarik memiliki flens dengan lebar 1200 mm dan tebal 150 mm. Rusuknya memiliki lebar 150 mm dan tinggi 350 mm. Tinggi efektif potongan melintang penampang tersebut adalah 580 mm. Diketahui  $A_p = 200 \text{ mm}^2$ ,  $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ , dan  $f_p = 1600 \text{ N/mm}^2$ . Hitunglah kekuatan terhadap lentur penampang tersebut dengan menggunakan Peraturan I.S. yang telah direvisi.

$$\begin{aligned} \text{Diketahui } f_{ck} &= 50 \text{ N/mm}^2 & b &= 300 \text{ mm} \\ f_p &= 1600 \text{ N/mm}^2 & d &= 500 \text{ mm} \\ A_p &= 200 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Asumsikan bahwa sumbu netral terletak di dalam flens dan nilai  $b = 300 \text{ mm}$  untuk perhitungan perbandingan tulangan efektif.

$$\left( \frac{f_p A_p}{f_{ck} b d} \right) = \left( \frac{1600 \times 200}{50 \times 300 \times 500} \right) = 0,04$$

Dari Tabel 7.1, nilai-nilai yang bersesuaian untuk perbandingan-perbandingan tersebut adalah

$$\left( \frac{f_{pu}}{0,87 f_p} \right) = 1,0 \quad \text{dan} \quad \left( \frac{x_u}{d} \right) = 0,09$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi } f_{pu} &= (0,87 \times 1600) = 1392 \text{ N/mm}^2 \\ x_u &= (0,09 \times 500) = 45 \text{ mm} \end{aligned}$$

Asumsi bahwa sumbu netral terletak di dalam flens adalah benar. Dengan demikian, kekuatan terhadap lentur ultimit penampang tersebut diberikan oleh

$$\begin{aligned} M_u &= f_{pu} A_p (d - 0,42 x_u) \\ &= 1392 \times 200 (500 - 0,42 \times 45) \\ &= 134 \times 10^6 \text{ N mm} \\ &= 134 \text{ kN m} \end{aligned}$$

### CONTOH 7.5

Sebuah penampang-T pratarik memiliki flens dengan lebar 1200 mm dan tebal 150 mm. Lebar dan tinggi rusuk besturut-turut adalah 300 mm dan 1500 mm. Luas baja bermutu tinggi adalah  $4700 \text{ mm}^2$  dan ditempatkan pada tinggi efektif sebesar 1600 mm. Bila kekuatan kubus karakteristik beton dan baja adalah  $40 \text{ N/mm}^2$  dan  $1600 \text{ N/mm}^2$ , hitunglah kekuatan terhadap lentur penampang T tersebut.

Diketahui data:

$$\begin{aligned} A_p &= 4700 \text{ mm}^2 & b &= 1200 \text{ mm} \\ f_{ck} &= 40 \text{ N/mm}^2 & b_w &= 300 \text{ mm} \\ f_p &= 1600 \text{ N/mm}^2 & d &= 1600 \text{ mm} \\ t &= 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_p &= (A_{pw} + A_{pf}) \\ A_{pf} &= 0,44 f_{ck} (b - b_w)(t/f_p) \\ &= 0,44 \times 40 (1200 - 300)(150/1600) = 1485 \text{ mm}^2 \\ A_{pw} &= (4700 - 1485) = 3215 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Perbandingan } \left( \frac{A_{pw} f_p}{b_w d f_{ck}} \right) = \left( \frac{3215 \times 1600}{300 \times 1600 \times 40} \right) = 0,2679$$

Dari Tabel 7.1 (atau Tabel 11 IS: 1343-1980)

$$\begin{aligned} \left( \frac{f_{pu}}{0,87 f_p} \right) &= 1,00 \quad \therefore f_{pu} = (0,87 \times 1600) = 1392 \text{ N/mm}^2 \\ \left( \frac{x_u}{d} \right) &= 0,56 \quad \dots x_u = (0,56 \times 1600) = 896 \text{ mm} \\ M_u &= f_{pu} A_{pw} (d - 0,42 x_u) + 0,44 f_{ck} (b - b_w) t (d - 0,5t) \\ &= 1392 \times 3215 (1600 - 0,42 \times 896) \\ &\quad + 0,44 \times 40 \times 900 \times 150 (1600 - 75) \\ &= (5477 \times 10^6) + (3623 \times 10^6) \\ &= 9100 \times 10^6 \text{ N mm} \\ &= 9100 \text{ kN m} \end{aligned}$$

### 7.3.2 Ketentuan-ketentuan Peraturan Inggris

Peraturan Inggris CP 110 menetapkan bahwa distribusi tegangan untuk batang beton prategang dapat dianggap persegi panjang dengan nilai tegangan rata-rata sebesar 0,4 kali kekuatan tekan kubus karakteristik. Kekuatan terhadap lentur ultimit penampang beton prategang dengan tendon terekat (bonded) dinyatakan sebagai

$$M_u = f_{pb} A_{ps} (d - 0,5x)$$

di mana,

- $f_{pb}$  = tegangan tarik pada tendon pada saat keruntuhannya
- $A_{ps}$  = luas tulangan tarik
- $d$  = tinggi efektif
- $x$  = kedalaman sumbu netral
- $f_{pu}$  = kekuatan tarik ultimit (karakteristik) tendon, dan
- $f_{cu}$  = kekuatan tekan kubus karakteristik beton.

Pada batang prategang dengan tulangan-kurang dengan persentase baja rendah, tegangan yang timbul dapat dianggap sama dengan kekuatan tariknya, tetapi akan berkurang kalau persentasenya bertambah. Faktor ini ditunjukkan dalam Tabel-tabel rencana 7.1 dan 7.2 yang dianjurkan dalam CP-110 di mana perbandingan tulangan efektif menentukan nilai-nilai perbandingan,  $(f_{pb}/f_{pu})$ ,  $(f_{pb}/f_{pe})$ , dan  $(x/d)$ .

TABEL 7.3 Kondisi pada Keadaan Batas Ultimit untuk Balok Persegi Panjang dengan Tendon Pratarik atau dengan Tendon Pascatarik yang mempunyai Rekat Efektif (Peraturan Inggris CP 110)

$\left(\frac{f_{pu}A_{ps}}{f_{cu}bd}\right)$	$(f_{pb}/f_{pu})$		$x/d$	
	Pratarik	Pascatarik dengan daya rekat efektif	Pratarik	Pascatarik dengan daya rekat efektif
0,025	1,0	1,0	0,054	0,054
0,05	1,0	1,0	0,109	0,109
0,10	1,0	1,0	0,217	0,217
0,15	1,0	1,0	0,326	0,326
0,20	1,0	0,95	0,435	0,414
0,25	1,0	0,90	0,542	0,488
0,30	1,0	0,85	0,655	0,558
0,40	0,9	0,75	0,783	0,653

#### CONTOH 7.6

Sebuah balok pratarik dengan penampang persegi panjang, lebar 400 mm dan tinggi keseluruhan 600 mm, diberi prategang dengan kawat baja bermutu tinggi dengan luas penampang  $700 \text{ mm}^2$  dan terletak 60 mm dari sofot penampang. Kalau kekuatan kubus beton karakteristik sama dengan  $55 \text{ N/mm}^2$  dan kekuatan tarik baja sama dengan  $1600 \text{ N/mm}^2$ , hitunglah kekuatan terhadap lentur ultimit dari penampang tersebut kalau penampang itu diberi tulangan baja bermutu tinggi yang luas penampangnya  $450 \text{ mm}^2$  dengan memakai rekomendasi CP 110.

TABEL 7.4 Kondisi pada Keadaan Batas Ultimit untuk Balok Persegi Panjang Pascatarik yang mempunyai Tendon Tanpa Daya Rekat (Peraturan Inggris CP-110)

$\left(\frac{f_{pb}A_{ps}}{f_{cu}bd}\right)$	$f_{pb}/f_{pe}$			$x/d$		
	$L/d$			$L/d$		
	30	20	10	30	20	10
0,025	1,23	1,34	1,45	0,10	0,10	0,10
0,05	1,21	1,32	1,45	0,16	0,16	0,18
0,10	1,18	1,26	1,45	0,30	0,32	0,36
0,15	1,14	1,20	1,36	0,44	0,46	0,52
0,20	1,11	1,16	1,27	0,56	0,58	0,64

$$A_s = 1700 \text{ mm}^2 \quad f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2 \\ b = 400 \text{ mm} \quad f_{cu} = 55 \text{ N/mm}^2 \\ d = 540 \text{ mm}$$

$$\text{Jadi, perbandingan } \left(\frac{f_{pu}A_{ps}}{f_{cu}bd}\right) = \left(\frac{1600}{55} \times \frac{1700}{400 \times 540}\right) = 0,23$$

Dari Tabel 7.3, untuk balok pratarik,

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_{pb}A_{ps}}{f_{pe}}\right) &= 1,00 \\ \text{Jadi} \quad f_{pb} &= 1600 \text{ N/mm}^2 \\ \text{dan} \quad (x/d) &= 0,50 \text{ dan } x = 270 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kekuatan terhadap lentur ultimit dari penampang adalah.

$$M_u = f_{pb} A_{ps} (d - 0,5x) = [1600 \times 1700 \times (540 - 0,5 \times 270)] \\ = 1100 \times 10^6 \text{ N mm} = 1100 \text{ kN m}$$

#### CONTOH 7.7

Sebuah balok prategang terekat berpenampang persegi panjang lebar 150 mm dan tinggi 350 mm, mempunyai beton pelindung efektif setebal 50 mm. Bila diketahui  $f_{cu} = 40 \text{ N/mm}^2$  dan  $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ , hitunglah kekuatan terhadap lentur ultimit dari penampang tersebut kalau penampang itu diberi tulangan baja bermutu tinggi yang luas penampangnya  $450 \text{ mm}^2$  dengan memakai rekomendasi CP 110.

$$\begin{aligned} A_{ps} &= 450 \text{ mm}^2 \quad f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2 \\ b &= 150 \text{ mm}^2 \quad f_{cu} = 40 \text{ N/mm}^2 \\ d &= 300 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Perbandingan tulangan efektif ditentukan oleh

$$\left(\frac{f_{pu}A_{ps}}{f_{cu}bd}\right) = \left(\frac{1600}{40} \times \frac{450}{150 \times 300}\right) = 0,40$$

Tegangan pada saat keruntuhan baja dan kedalaman sumbu netral diperoleh dari Tabel 7.1 sebagai,

$$\begin{aligned} (f_{pb}/f_{pu}) &= 0,90 \text{ dan} & (x/d) &= 0,783 \\ \therefore f_{pb} &= 1440 \text{ N/mm}^2, & x &= 234,9 \text{ mm} \\ M_u &= f_{pb} A_{ps} (d - 0,5 x) = [1440 \times 450 (300 - 0,5 \times 234,9)] \\ &= 118 \times 10^6 \text{ N mm} \\ &= 118 \text{ kN m} \end{aligned}$$

### 7.3.3 Rekomendasi Peraturan Amerika

Syarat-syarat peraturan bangunan American Concret Institute<sup>7</sup> menganjurkan persamaan-persamaan terpisah untuk menghitung kekuatan terhadap lentur penampang beton dengan tulangan-kurang dan tulangan-lebih. Pembatasan terhadap perbandingan tulangan efektif atau indeks baja tulangan ditetapkan sama dengan 0,3, yang menjadi garis pemisah antara batang-batang dengan tulangan-kurang dan tulangan-lebih.

Momen lawan ultimit penampang, di mana perbandingan tulangan efektif  $\left(\frac{A_{ps}f_{pu}}{bd f_{cy}}\right)$  tidak melampaui 0,3, dihitung dengan persamaan-persamaan berikut yang didasarkan atas suatu laporan oleh Warwaruk dan kawan-kawan<sup>8</sup>.

(a) Untuk penampang persegi panjang atau penampang yang mempunyai flens di mana sumbu netralnya terletak di dalam flens:

$$M_u = \phi \left[ A_{ps} f_{pb} d \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{A_{ps} f_{pb}}{b d f_{cy}} \right) \right] = \phi [A_{ps} f_{pb} (d - x/2)]$$

di mana,

- $\phi$  = faktor reduksi kapasitas (0,9 untuk lenturan)
- $f_{pb}$  = tegangan pada tendon pada waktu keruntuhan batang
- $d$  = tinggi efektif
- $b$  = lebar daerah tekan
- $f_{cy}$  = kekuatan tekan silinder beton
- $A_{ps}$  = luas baja di dalam daerah tarik
- $x$  = tebal blok tegangan persegi panjang

(b) Untuk penampang yang mempunyai flens di mana sumbu netralnya jatuh di luar flens:

$$M_u = \phi [A_{psw} f_{pb} (d - x/2) + 0,85 f_{cy} (b - b_w) h_f (d - h_f/2)]$$

di mana

$$\begin{aligned} A_{psw} &= A_{ps} - A_{psf} \\ A_{psf} &= 0,85 f_{cy} (b - b_w) h_f / f_{pb} \\ h_f &= tebal flens \\ b_w &= tebal badan \end{aligned}$$

Di dalam persamaan-persamaan ini, nilai tegangan pada tendon ( $f_{pb}$ ) yang timbul pada tahap keruntuhan batang dinyatakan sebagai fungsi dari kekuatan tarik ultimit baja  $f_{pu}$ ,

perbandingan tulangan prategang  $A_{ps}/bd$ , dan kekuatan tekan silinder beton untuk batang terekat (bonded). Dalam hal batang tak-terekat (unbonded) dengan prategang efektif  $f_{pe}$ ,  $f_{cy}$ , dan perbandingan tulangan prategang.

Persamaan-persamaan yang dianjurkan adalah:

(a) Untuk batang terekat,

$$f_{pb} = f_{pu} \left( 1 - 0,5 \frac{A_{ps} f_{pu}}{bd f_{cy}} \right)$$

(b) Untuk batang tak-terekat:

$$f_{pb} = \left[ f_{pe} + 70,3 + \frac{f_{cy} bd}{100 A_{ps}} \right] \text{ N/mm}^2$$

tetapi tidak lebih dari  $f_{pu}$  atau  $(f_{pe} + 420)$ .

Momen lawan ultimit penampang di mana indeks penulangan melebihi 0,3 dihitung dengan persamaan-persamaan berikut, untuk batang terekat maupun batang tak-terekat:

(a) Untuk penampang persegi panjang atau penampang yang memakai flens di mana sumbu netralnya terletak di dalam flens,

$$M_u = \phi [(0,25 f_{cy} bd^2)]$$

(b) Untuk penampang yang memakai flens di mana sumbu netralnya jatuh di luar flens,

$$M_u = \phi [(0,25 f_{cy} b_w d^2 + 0,85 f_{cy} (b - b_w) h_f (d - 0,5 h_f)]$$

Dalam hal batang dengan tulangan yang tidak ditarik di dalam daerah tarik, kontribusinya terhadap gaya tarik dihitung sebagai hasil perkalian luasnya dengan kekuatan leleh tulangan.

### CONTOH 7.7

Sebuah balok prategang pratarik berpenampang persegi panjang, lebar 150 mm dan tinggi 350 mm, mempunyai beton pelindung efektif 50 mm. Kalau  $f_{cy} = 32 \text{ N/mm}^2$  dan  $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ , dengan memakai ACI: 318-71 tentukanlah:

- (a) Luas baja minimum untuk mencegah keruntuhan penampang akibat patahnya baja,
- (b) Luas baja maksimum yang tepat untuk mencegah keruntuhan akibat perpanjangan baja yang berlebihan serta diikuti dengan pecahnya beton,
- (c) Kekuatan terhadap lentur yang sesuai dengan kasus (b); dan
- (d) Kekuatan terhadap lentur penampang tersebut kalau luas baja dalam kasus (b) dilipat-duaikan.

(a) Luas baja minimum  $A_{ps}$  ditentukan oleh

$$A_{ps} = 0,004 A \text{ di mana } A = (bh/2) = 0,004 \left( \frac{150 \times 350}{2} \right) = 105 \text{ mm}^2$$

(b) Perbandingan tulangan efektif

$$\left( \frac{A_{ps} f_{pb}}{bd f_{cy}} \right) = 0,3 \quad (7.1)$$

$$\text{di mana } f_{pb} = f_{pu} \left( 1 - 0,5 \frac{A_{ps} f_{pu}}{bd f_{cy}} \right) = 1600 \left( 1 - 0,5 \frac{105 \times 1600}{bd \times 32} \right)$$

Dengan mengantikan nilai  $f_{pb}$  dalam Persamaan 7.1 dan diselesaikan,

$$(A_{ps}/bd) = 0,0072$$

Jadi  $A_{ps} = (0,0072 \times 150 \times 300) = 324 \text{ mm}^2$

$$(c) f_{pb} = 1600 (1 - 0,5 \times 0,0072 \times 50) = 1312 \text{ N/mm}^2$$

$$M_u = 0,9 [324 \times 1312 \times 300 (1 - 0,59 \times 0,0072 \times 41)] = 95 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm} = 95 \text{ kN m}$$

(d) Kalau luasnya dilipat-duakan,

$$A_{ps} = (2 \times 324) = 648 \text{ mm}^2$$

Penampang tersebut merupakan tulangan-lebih dan oleh karena itu,

$$M_u = \phi [(0,25 f_{cy} bd^2)] = 0,9 (0,25 \times 32 \times 150 \times 300^2) = 97 \times 10^6 \text{ N mm} = 97 \text{ kN m}$$

#### CONTOH 7.8

Sebuah penampang-I yang tidak simetris mempunyai lebar flens atas 300 mm. Tebal flens berubah dari 80 mm pada ujung-ujungnya sampai 100 mm pada pertemuan dengan badan yang mempunyai tebal 80 mm. Tinggi efektif penampang melintang sama dengan 400 mm. Bila diketahui  $f_{cy} = 32 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{pe} = 800 \text{ N/mm}^2$  dan  $A_{ps} = 400 \text{ mm}^2$ , hitunglah kekuatan penampang tersebut terhadap lentur kalau ia

- (a) terekat secara penuh, dan
- (b) tak-terekat,

dengan memakai ACI 318-71. Tebal merata ekivalen dari flens  $h_f$  sama dengan 87,3 mm.

$$A_{psw} = A_{ps} - A_{psf}$$

$$A_{psf} = 0,85 f_{cy} (b - b_w) h_f / f_{pu}$$

(a) Untuk batang terekat,

$$f_{pb} = f_{pu} \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{A_{ps} f_{pu}}{b f_{cy}} \right) \right] = 1600 \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{400}{80 \times 400} \times \frac{1600}{32} \right) \right] = 1098 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{psf} = 0,85 \times 32 (300 - 80) \frac{87,3}{1600} = 326,5 \text{ mm}^2$$

Oleh karena luas total baja yang disediakan adalah 400 mm<sup>2</sup>, maka sumbu netral jatuh di dalam flens.

$$f_{pb} = 1600 \left[ 1 - 0,5 \left( \frac{400}{300 \times 400} \times \frac{1600}{32} \right) \right] = 1460 \text{ N/mm}^2$$

$$M_u = 0,9 \left[ 400 \times 1460 \times 400 \left( 1 - 0,59 \times \frac{400}{300 \times 400} \times \frac{1460}{32} \right) \right] = 192 \times 10^6 \text{ N mm} = 192 \text{ kN m}$$

(b) Kalau tendonnya tak-terekat:

$$f_{pb} = \left[ f_{pe} + 70,3 + \left( \frac{f_{cy} b \cdot d}{100 A_{ps}} \right) \right] = \left[ 800 + 70,3 \left( \frac{32 \times 300 \times 400}{100 \times 400} \right) \right] = 966 \text{ N/mm}^2$$

$$M_u = 0,9 \left[ 400 \times 966 \times 400 \left( 1 - 0,59 \times \frac{400 \times 996}{300 \times 400 \times 32} \right) \right] = 131 \times 10^6 \text{ N mm} = 131 \text{ kN m}$$

#### 7.4 ANALISIS PERBANDINGAN ATAS PROSEDUR-PROSEDUR PERATURAN

Suatu analisis perbandingan atas berbagai ketetapan peraturan nasional untuk perhitungan kekuatan penampang beton prategang terhadap lentur menunjukkan bahwa rekomendasi peraturan India dan Amerika kurang lebih sama dalam hubungannya dengan demarkasi penampang yang mempunyai tulangan-kurang (under-reinforced) dan yang mempunyai tulangan-lebih (over-reinforced) yang didasarkan pada perbandingan tulangan efektif. Kekuatan terhadap lentur ultimit dan penampang yang mempunyai tulangan-kurang menurut peraturan-peraturan ini didasarkan pada kompatibilitas gaya yang konsisten dengan blok tegangan persegi panjang, di mana tebalnya ditentukan oleh kesetimbangan gaya-gaya pada penampang tersebut. Pembatasan perbandingan tulangan efektif menyatakan secara tak langsung bahwa tebal maksimum yang diperkenankan dari blok tegangan persegi panjang di dalam peraturan Amerika dibatasi sampai 0,36  $d$  untuk penampang dengan tulangan-kurang.

Untuk penampang yang mempunyai tulangan-lebih, kedua peraturan di atas mengajurkan persamaan-persamaan kekuatan terhadap lentur yang didasarkan atas kekuatan beton dalam bagian tekan karena tegangan-tegangan pada baja pada saat runtuh selalu lebih kecil dari kekuatan tarik tendon. Rumus yang dianjurkan untuk  $M_u$  didasarkan pada sebuah blok tegangan persegi panjang dengan tebal maksimum = 0,36  $d$  dalam hal peraturan Amerika dan 0,57  $d$  dalam rancangan peraturan standar India. Peraturan Amerika mempertahankan faktor reduksi merata sebesar  $\phi = 0,9$  baik pada jenis-jenis keruntuan yang terjadi pada keadaan tulangan-kurang maupun tulangan lebih.

Berlawanan dengan ini, perhitungan kekuatan terhadap lentur menurut peraturan Inggris didasarkan atas tegangan-tegangan yang timbul pada tendon dan tebal blok tegangan, yang selanjutnya dipengaruhi oleh perbandingan tulangan efektif dan sifat rekatannya antara tendon dengan beton sekelilingnya. Tegangan yang timbul pada tendon terekat pascatarik pada saat runtuh berkurang secara cepat sampai 75 persen kekuatan tarik karakteristik apabila perbandingan tulangan efektif mencapai nilai 0,40. Namun pada balok pratarik, di mana tingkat rekatannya lebih baik daripada balok pascatarik yang di-grout, tegangan pada tendon pada saat runtuh hampir sama dengan 90 persen kekuatan tarik ultimitnya, walaupun dengan perbandingan tulangan efektif yang lebih tinggi.

#### 7.5 PENAMPANG DENGAN BAJA DALAM DAERAH TEKAN

Batang lentur beton struktural pada umumnya dilengkapi dengan tulangan nominal di dalam daerah tekan untuk mendukung tulangan pada badan. Dalam hal balok gording pratarik, sebagian dari kawat yang ditiriskan ditempatkan di daerah tekan yang berfungsi untuk tujuan ganda, yaitu untuk mengatur tegangan-tegangan dan sebagai batang penggantung untuk tulangan geser vertikal. Dalam hal demikian, suatu perkiraan atas kekuatan ultimit batang dalam hal lentur diperlukan untuk menghitung faktor beban terhadap batas keadaan runtuh.

Metode kompatibilitas regangan yang teliti dapat dipakai secara langsung kalau penampangnya mempunyai tulangan-kurang (under-reinforced) atau tulangan-lebih (over-reinforced).

ced). Namun, untuk penampang yang didesain untuk runtuh akibat perpanjangan baja yang berlebihan dan diikuti oleh pecahnya beton, suatu cara yang disederhanakan dari metode kompatibilitas regangan dapat dipakai untuk menghitung kekuatan penampang yang demikian terhadap lentur dengan baja nominal dalam daerah tekan yang ditarik maupun yang tidak ditarik.

### 7.5.1 Penampang dengan Baja yang Tidak Ditarik dalam Daerah Tekan

Dengan memperhatikan Gambar 7.6,

$$A'_s = \text{luas tulangan yang tidak ditarik dalam daerah tekan}$$

$$c = \text{beton pelindung efektif}$$

$$d = \text{tinggi efektif}$$

$$A_{ps} = \text{luas baja bermutu tinggi dalam daerah tarik}$$

$$\epsilon_{cu} = \text{regangan pada beton pada saat runtuh, dimisalkan sama dengan } 0,0035$$

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

$$x = \text{tebal blok tegangan persegi panjang .}$$

$$\text{Regangan pada tulangan tekan pada saat runtuh} = \epsilon_{cu} (1 - c/x)$$

$$\text{Tegangan pada baja tekan} = E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)$$

$$\text{Gaya pada baja tekan}, C_2 = A'_s E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)$$

$$\text{Gaya pada baja tarik} = A_{ps} f_{pu}$$

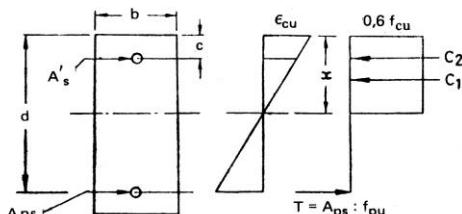
Kompatibilitas gaya-gaya pada penampang menghasilkan

$$A_{ps} f_{pu} = (C_1 + C_2) = 0,6 f_{cu} b x + A'_s E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)$$

Tebal blok tegangan  $x$  dihitung dengan cara coba-coba dari persamaan ini dan tegangan pada baja tekan dibatasi sampai suatu nilai yang tidak melebihi tegangan leleh.

Momen lawan ultimit penampang diperoleh dari persamaan

$$M_u = 0,6 f_{cu} b x (d - x/2) + A_s E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x) (d - c)$$



Gambar 7.6 Gaya-gaya pada Penampang dengan Baja Tekan.

### 7.5.2 Penampang dengan Baja yang Ditarik dalam Daerah Tekan

Kalau  $f_{pe}$  = prategang efektif pada kawat yang terletak dalam daerah tekan setelah semua kehilangan.

$$\text{Tegangan pada kawat pada daerah tekan} = [f_{pe} - E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)]$$

$$\text{Gaya pada kawat } C_2 = A'_s [f_{pe} - E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)]$$

$$\text{Gaya pada baja tarik} = A_{ps} f_{pu}$$

Untuk keseimbangan gaya-gaya,

$$A_{ps} f_{pu} = (C_1 + C_2) = 0,6 f_{cu} b x + A'_s [f_{pe} - E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x)]$$

Besarnya  $x$  dihitung dari persamaan ini dengan cara coba-coba dan tegangan pada baja tekan tidak boleh melebihi 0,2 persen tegangan uji.

Momen lawan ultimit dievaluasi dengan persamaan

$$M_u = 0,6 f_{cu} b x (d - x/2) + A'_s [f_{pe} - E_s \epsilon_{cu} (1 - c/x) (d - c)]$$

Dalam kebanyakan hal, bila prategang efektif  $f_{pe}$  tidak kurang dari 50 persen kekuatan tendon, regangan beton dalam tekanan akan menguraikan tegangan ini akan tetapi mungkin tidak cukup untuk menimbulkan tegangan tekan pada saat runtuh pada kawat yang terletak dalam daerah tekan. Akibatnya, tendon ini mempunyai pengaruh yang tidak menguntungkan terhadap momen ultimit, dan dalam hal ini di mana keruntuhan disebabkan oleh perpanjangan baja yang berlebihan, pengurangan tersebut cukup kecil untuk diabaikan.

### CONTOH 7.9

Sebuah balok beton prategang pratarik yang mempunyai penampang persegi panjang dengan lebar 100 mm dan tinggi total 250 mm diberi tulangan dengan baja bermutu tinggi ( $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ ) seluas  $100 \text{ mm}^2$  yang ditempatkan 50 mm dari sofif balok. Dua batang baja lunak berdiameter 8 mm (tegangan leleh =  $280 \text{ N/mm}^2$ ) dipasang dekat permukaan bidang tekan dengan pelindung beton efektif setebal 30 mm. Kalau kekuatan kubus beton sama dengan  $40 \text{ N/mm}^2$ , tentukanlah kekuatan terhadap lentur ultimit penampang melintangnya,

- (a) dengan memperhitungkan pengaruh baja tekan; dan
- (b) dengan mengabaikan baja tekan. Modulus elastisitas baja sama dengan  $210 \text{ kN/mm}^2$

$$A'_s = (2 \times 50) = 100 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = 100 \text{ mm}^2$$

$$x = \text{tebal blok tegangan,}$$

$$\text{Gaya pada blok tegangan beton} = (0,640100 x) = 2400 x$$

$$\text{Gaya pada baja tekan} = (100 \times 0,003 \times 210 \times 10^3)$$

$$= 63000 (1 - 30/x)$$

Untuk keseimbangan,

$$63000 (1 - 30/x) + 2400 x = (1600 \times 100)$$

Diselesaikan dengan coba-coba,

$$x = 55 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada baja tekan} &= 200 \times 10^3 \times 0,0030 \quad \left(1 - \frac{300}{55}\right) \\ &= 280 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (a) M_u &= (2400/55)(200 - 55/2) + 280 \times 100 \times (200 - 30) \\ &= 276 \times 10^5 \text{ N.mm} = 27,6 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

- (b) Dengan mengabaikan baja tekan

$$(A_{ps} f_{pu})/(bd f_{cu}) = 0,20$$

Dengan melihat Tabel 7.1,

$$\begin{aligned} (f_{pb} f_{pu}) &= 1,0, \text{ dan } (x/d) = 0,435 \\ x &= 87 \text{ mm} \\ M_u &= 1600 \times 100 (200 - 0,5 \times 87)/10^6 = 25 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

#### CONTOH 7.10

Sebuah gording pratarik dengan penampang persegi panjang, lebar 100 mm dan tinggi total 250 mm, diberi tegangan oleh baja bermutu tinggi seluas  $100 \text{ mm}^2$  yang terletak 50 mm dari sofit dan batang-batang baja lunak seluas  $10 \text{ mm}^2$  pada suatu jarak 30 mm dari tepi permukaan bidang tekan. Tegangan efektif pada kawat setelah semua kehilangan diperhitungkan sama dengan  $500 \text{ N/mm}^2$ . Kalau  $f_{pu} = 1600 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{cu} = 40 \text{ N/mm}^2$ , dan  $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ , hitunglah kekuatan penampang tersebut terhadap lentur dengan mempertimbangkan pengaruh baja dalam daerah tekan dan bandingkanlah dengan ketentuan-ketentuan peraturan standar Inggris, dengan mengabaikan baja tekan.

$$\begin{aligned} A_{ps} &= 100 \text{ mm}^2 & f_{pe} &= 500 \text{ N/mm}^2, \\ A_s &= 10 \text{ mm}^2 & f_{cu} &= 40 \text{ N/mm}^2, \text{ dan} \\ f_{pu} &= 1600 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Gaya pada kawat-kawat dalam daerah tekan,

$$= 10 [500 - 210 \times 10^3 \times 0,0035 (1 - 30/x)]$$

Gaya pada baja tarik =  $(100 \times 1600) = 160.000 \text{ N}$

Gaya pada blok tegangan beton =  $(0,6 \times 40 \times 100 \times x) = 2400 x$

Untuk keseimbangan gaya,

$$160.000 = 2400 x - 1930 + 207900/x$$

Diselesaikan,  $x = 66 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} M_u &= [(2400 \times 66) (200 - 66/2) + 1200 (200 - 300)] \\ &= 26,7 \times 10^6 \text{ N.mm} = 26,7 \text{ kN m} \end{aligned}$$

Dengan mengabaikan baja tekan,

$$\text{perbandingan } (A_{ps} f_{pu})/(bd f_{cu}) = 0,20$$

Dengan melihat Tabel 7.1,

$$\begin{aligned} (f_{pb}/f_{pu}) &= 1,0, \text{ dan } (x/d) = 0,435 \\ x &= (0,435 \times 200) = 87 \text{ mm} \\ M_u &= [1600 \times 100 (200 - 0,5 \times 87)/10^6] = 25 \text{ kN m} \end{aligned}$$

