

## **BAB III**

### **ANALISIS DAN PERENCANAAN**

#### **3.1 Pengertian**

Analisis adalah suatu penentuan tegangan-tegangan yang terjadi pada baja dan beton khususnya dalam pelat beton prategang dengan bentuk dan ukuran penampang pelat tersebut telah diketahui.

Sedangkan perencanaan adalah proses merencanakan suatu bentuk penampang pelat beton prategang dengan kekuatan penampang yang direncanakan tersebut dapat menahan dengan aman perilaku-perilaku struktur pelat yang terjadi, seperti gaya lentur, gaya geser, dan pengaruh retak lentur.

Untuk mendisain dan merencanakan struktur pelat beton prategang, perlu adanya pengetahuan yang luas tentang perilaku elemen-elemen struktur yang bersangkutan. Keadaan pembebanan yang bervariasi juga sangat penting diketahui untuk menghasilkan perencanaan struktur yang lebih ekonomis.

#### **3.2 Sistem Prategang Sebagian**

Elemen struktur prategang sebagian adalah elemen struktur prategang yang direncanakan dengan mengijinkan terjadinya tegangan tarik pada saat beban kerja. Namun demikian tidak semua struktur yang direncanakan dengan prategang sebagian akan mengalami tegangan tarik pada saat beban kerja. Demikian juga

sebaliknya, pada struktur yang direncanakan dengan sistem prategang penuh mungkin akan mengalami tegangan tarik pada beban kerja berlebihan.

Pada pelat beton prategang sebagian akibat diijinkannya tegangan tarik pada beton kadang-kadang mengalami permasalahan karena beton mungkin sudah retak sebelumnya, sehingga tidak dapat menahan tarikan. Sistem prategang penuh juga mengalami permasalahan, yaitu akan terjadinya lendutan ke atas berlebihan yang tidak dikehendaki.

Sistem prategang sebagian bertujuan untuk menghilangkan atau mengontrol lebar retak pada beban kerja dengan menetapkan tegangan tarik yang diijinkan sedikit lebih kecil dari tegangan retak beton. Meskipun demikian tetap dibutuhkan kewaspadaan pada sistem prategang sebagian, jika kemungkinan terjadinya retak akibat beban kerja. Jika dibandingkan dengan beton bertulang, tegangan tarik tinggi dan retak biasanya terjadi pada beban kerja maka cukup logis untuk mengijinkan terjadinya retak rambut pada beton prategang.

### 3.3 Kehilangan Gaya Prategang Total

Analisis dan perencanaan keseluruhan dari komponen struktur beton prategang akan menyertakan pertimbangan terhadap gaya-gaya efektif dari tendon prategang pada setiap tahap pembebanan. Adapun tahapan-tahapan untuk mengetahui tegangan dan perilaku pelat beton prategang menurut T.Y Lin dan H. Burns, 1988 adalah sebagai berikut ini.

1. Segera setelah pelimpahan gaya prategang pada penampang beton, tegangan-tegangan yang terjadi dievaluasi sebagai tolak ukur perilaku

struktur. Pengecekan ini termasuk gaya terbesar pada tendon yang mungkin jauh di bawah kekuatan beton pada umur 28 hari ( $f'_c$ ).

Peraturan ACI-Code memberikan persyaratan terhadap kekuatan beton ( $f'_{ci}$ ) pada tahap permulaan, yaitu batas tegangan ijin beton pada saat transfer yang terjadi penampang beton sebesar  $f'_{ci} \leq f'_c$ .

2. Pada saat beban kerja dan semua kehilangan gaya prategang telah terjadi dengan tingkatan gaya prategang efektif untuk jangka panjang telah tercapai, tegangan-tegangan dicek lagi sebagai tolak ukur perilaku dan kekuatan bahan.

Untuk sifat baja dan beton pada kondisi normal menurut T.Y Lin dan H. Burns, 1988 memberikan prosentase kehilangan gaya prategang total, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Prosentase kehilangan gaya prategang total

Kehilangan gaya prategang akibat :	Pratarik (%)	Pasca-tarik (%)
- Perpendekan elastik dan lenturan balok	4	1
- Rangkak beton	6	5
- Susut beton	7	6
- Relaksasi baja	8	8
<b>Kehilangan gaya prategang total</b>	<b>25</b>	<b>20</b>

Sumber : T. Y. Lin dan H. Burns, 1982

Kehilangan gaya prategang total untuk pra-tarik yang diijinkan sebesar 25% dan pasca-tarik sebesar 20%. Untuk gaya prategang efektif yang terjadi adalah

gaya prategang awal dikalikan dengan faktor reduksi (R). Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada rumus dibawah ini.

$$P_e = R \cdot P_o \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan :

$P_e$  = gaya prategang efektif tendon (kN)

$P_o$  = gaya prategang awal tendon (kN)

R = faktor reduksi gaya prategang

### 3.4 Perencanaan Penampang Pelat Beton Prategang

Penampang pelat beton prategang direncanakan dengan memperhitungkan tahanan minimum yang diperlukan pada keadaan-keadaan batas tertentu, seperti keruntuhan, lendutan, dan retak. Untuk masing-masing keadaan batas tersebut, nilai tahanan rencana harus sama atau melebihi jumlah beban rencana yang diperoleh dengan mengalikan beban-beban eksternal terhadap faktor-faktor beban yang telah ditetapkan.

Dalam merencanakan pelat beton prategang dua arah beberapa ahli telah memberikan batasan yaitu untuk nilai perbandingan antara panjang bentang dengan tebal pelat menurut Antoine E. Naaman, 1982 ditetapkan sebesar 40 sampai 55 dan menurut Arthur H. Nilson, 1987 memberikan nilai antara 45 sampai 50. Pendapat kedua ahli tersebut telah disesuaikan dengan ketentuan-ketentuan yang disyaratkan oleh ACI-Code. Dalam analisis ini diambil sebesar 45 sebagai nilai perbandingan antara jumlah rata-rata panjang bentang pada masing-

masing arah terhadap tebal pelat, yang diharapkan dapat diperoleh ketebalan pelat yang efisien, ekonomis dan mampu menahan gaya lentur, geser dan bebas terhadap pengaruh retak lentur. Sehingga untuk merencanakan ketebalan pelat tersebut dihitung dengan pendekatan rumus berikut ini.

$$h = \left( \frac{L_x + L_y}{2} \right) \cdot \frac{1}{45} \dots\dots\dots (3.2)$$

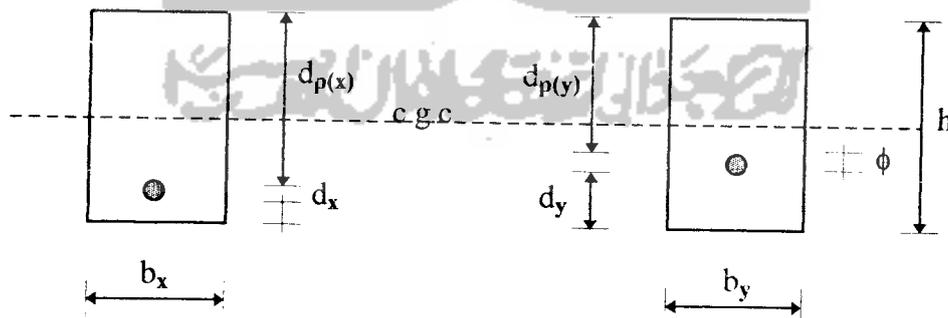
dengan :

$h$  = tebal pelat (mm)

$L_x$  = panjang bentang pelat arah - x (m)

$L_y$  = panjang bentang pelat arah - y (m)

Gambar dari potongan penampang pelat beton ditinjau sepanjang 1 meter panjang (m') pada masing-masing arah dapat ditunjukkan seperti Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Potongan penampang pelat beton prategang

dengan :

$h$  = tebal pelat total (mm)

$d_{p(x)}$  = jarak serat terluar dengan titik berat tendon arah - x (mm)

$d_{p(y)}$  = jarak serat terluar dengan titik berat tendon arah - y (mm)

$b_x$  = lebar pias pelat arah - x (m')

$b_y$  = lebar pias pelat arah - y (m')

$d_x$  = tebal selimut beton arah - x (mm)

$d_y$  = tebal selimut beton arah - y (mm)

$\phi$  = diameter tendon (mm)

Penentuan tebal pelindung beton yang terletak di bawah tulangan prategang harus mengikuti rekomendasi yang ditentukan oleh ACI-Code yang ditunjukkan dalam Tabel 3.2, kecuali apabila kondisi yang dihadapi berbeda dengan kondisi yang telah ditentukan dalam pedoman ACI-Code.

Tabel 3.2 Tebal minimum pelindung beton menurut ACI-Code

Kondisi Struktur	Tebal minimum (mm)
- Beton yang dicor langsung dan permanen berhubungan langsung dengan tanah	70
- Beton yang berhubungan langsung dengan tanah atau cuaca : - Dinding panel, pelat dan balok rusuk - Struktur lainnya	30 40
- Beton yang terlindung terhadap cuaca atau berhubungan dengan tanah : - Pelat, dinding dan balok rusuk - Balok dan kolom :	20
- Tulangan primer	40
- Balok ikat, tangga dan spiral	20
- Pelat cangkang, pelat lipat : - Tulangan No. 5, kawat W31 atau D31 atau kurang	10

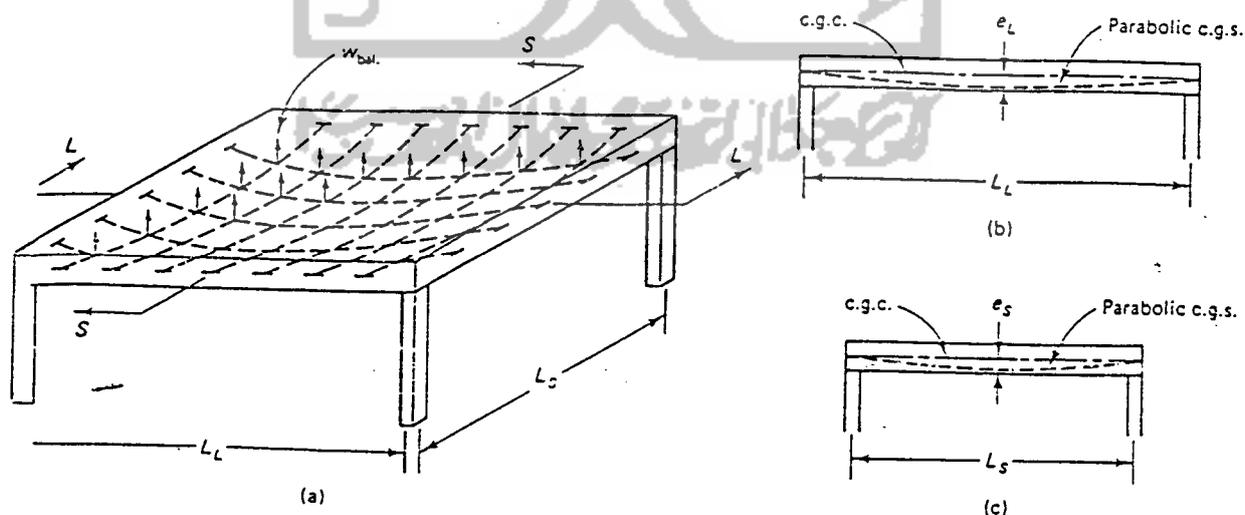
- Jenis penulangan lain yang lebih kecil	20
--	----

Sumber : Arthur H. Nilson, 1987

### 3.5 Metode Perimbangan Beban pada Pelat Beton Prategang Dua Arah

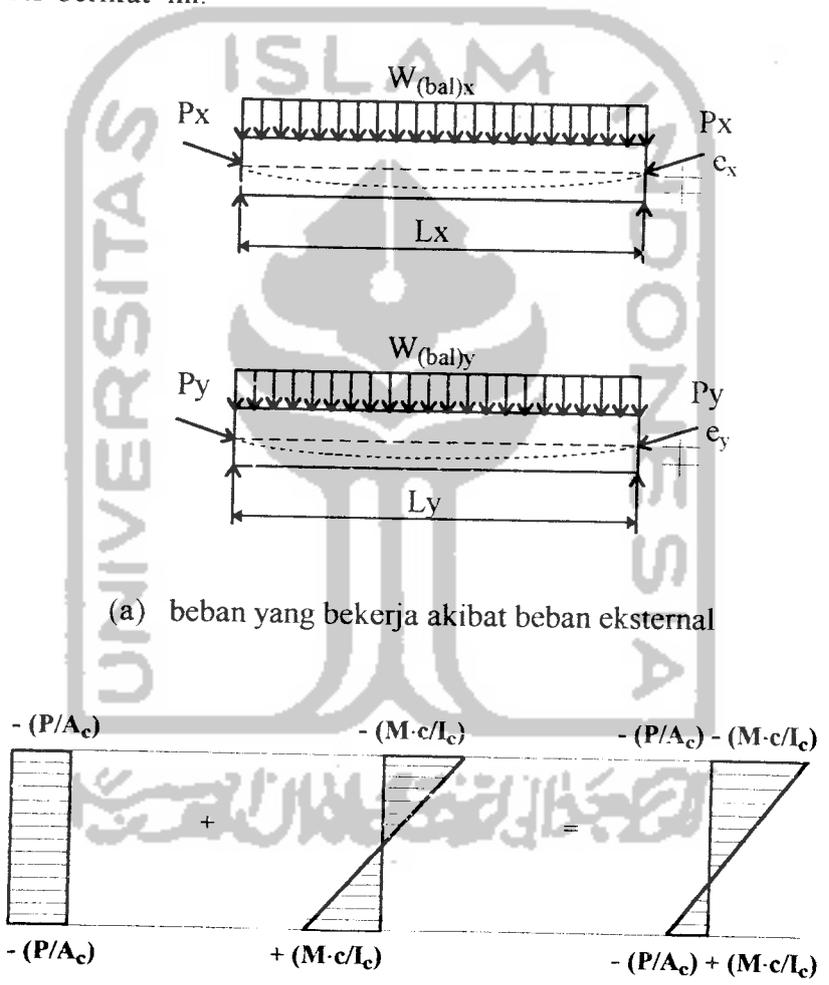
Prinsip-prinsip perimbangan beban dapat dilakukan dengan dua arah penegangan. Hal ini sangat cocok diterapkan dalam menganalisis pelat beton prategang karena tujuan dari penggunaan metoda perimbangan beban tersebut adalah mengimbangi beban-beban luar, sehingga seluruh struktur akan memiliki distribusi tegangan yang merata dalam masing-masing arah dan tidak melendut akibat pembebanan tersebut.

Sebagai suatu contoh analisis sederhana tentang metode perimbangan beban, dapat tinjau pelat beton prategang dua arah yang ditumpu oleh dinding atau balok pada masing-masing sisinya, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Perimbangan beban untuk pelat dua arah

Kabel-kabel prategang pada masing-masing arah akan menimbulkan gaya ke atas pada pelat. Jika jumlah komponen vertikalnya mengimbangi beban luar ke bawah sebesar ( $W$ ), maka dapat diperoleh disain beban berimbang pada masing-masing arah. Adapun diagram tegangan dan regangan yang terjadi pada penampang pelat untuk masing-masing arah, dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 3.3 berikut ini.



(a) beban yang bekerja akibat beban eksternal

(b) tegangan beton pada saat beban aksial dan momen eksternal.

Gambar 3.3 Konsep metode perimbangan beban pada pelat

Besarnya gaya perimbangan yang dihasilkan oleh tendon dengan gaya-gaya yang terdistribusi secara merata ke atas adalah sebagai berikut ini.

$$W_{(\text{bal})x} = \frac{8 \cdot P_{e(x)} \cdot c_x}{L_x^2} \dots\dots\dots (3.3.a)$$

$$W_{(\text{bal})y} = \frac{8 \cdot P_{e(y)} \cdot e_y}{L_y^2} \dots\dots\dots (3.3.b)$$

Dengan demikian gaya perimbangan total yang terjadi adalah sebagai berikut ini.

$$W_{(\text{bal}) \text{ total}} = W_{(\text{bal})x} + W_{(\text{bal})y}$$

$$W_{(\text{bal}) \text{ total}} = \frac{8 \cdot P_{e(x)} \cdot e_x}{L_x^2} + \frac{8 \cdot P_{e(y)} \cdot e_y}{L_y^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

Sedangkan untuk menghitung besar momen yang terjadi pada pelat beton prategang adalah sebagai berikut ini.

a. Pada saat beban mati total bekerja :

- arah - x

$$M_{D(x)} = \alpha_x \cdot (W_o + W_D) \cdot L_x^2 \dots\dots\dots (3.5.a)$$

- arah - y

$$M_{D(y)} = \alpha_y \cdot (W_o + W_D) \cdot L_y^2 \dots\dots\dots (3.5.b)$$

b. Pada saat beban hidup bekerja

- arah - x

$$M_{L(x)} = \alpha_x \cdot (W_L) \cdot L_x^2 \dots\dots\dots (3.6.a)$$

- arah - y

$$M_{L(y)} = \alpha_y \cdot (W_L) \cdot L_y^2 \dots\dots\dots (3.6.b)$$

Untuk mendapatkan koefisien momen ( $\alpha$ ) pada masing-masing arah pelat, didasarkan pada perbandingan antara panjang bentang arah - y dengan bentang arah - x, kemudian dicari besarnya koefisien tersebut pada grafik yang dikeluarkan oleh Edward G. Nawy, 1996.

Tegangan-tegangan yang terjadi pada serat penampang pelat beton saat beban hidup bekerja adalah sebagai berikut ini.

arah - x

$$f_{t(x)} = -\frac{P_{e(x)}}{b \cdot h} - \frac{M_{L(x)} \cdot c_x}{I_c} \dots\dots\dots (3.7.a)$$

$$f_{b(x)} = -\frac{P_{e(x)}}{b \cdot h} + \frac{M_{L(x)} \cdot c_x}{I_c} \dots\dots\dots (3.7.b)$$

arah - y

$$f_{t(y)} = -\frac{P_{e(y)}}{b \cdot h} - \frac{M_{L(y)} \cdot c_y}{I_c} \dots\dots\dots (3.8.a)$$

$$f_{b(y)} = -\frac{P_{e(y)}}{b \cdot h} + \frac{M_{L(y)} \cdot c_y}{I_c} \dots\dots\dots (3.8.b)$$

Sedangkan tegangan-tegangan yang terjadi pada serat penampang pelat beton saat beban mati total bekerja adalah sebagai berikut ini.

arah - x

$$f_{t(x)} = -\frac{P_{\alpha(x)}}{b \cdot h} + \frac{M_{D(x)} \cdot c_x}{I_c} \dots\dots\dots (3.9.a)$$

$$f_{b(x)} = -\frac{P_{\alpha(x)}}{b \cdot h} - \frac{M_{D(x)} \cdot c_x}{I_c} \dots\dots\dots (3.9.b)$$

arah - y

$$f_{t(y)} = -\frac{P_{\alpha(y)}}{b \cdot h} + \frac{M_{D(y)} \cdot c_y}{I_c} \dots\dots\dots (3.10.a)$$

$$f_{b(y)} = -\frac{P_{\alpha(y)}}{b \cdot h} - \frac{M_{D(y)} \cdot c_y}{I_c} \dots\dots\dots (3.10.b)$$

dengan :

$W_{(bal) x}$  = gaya perimbangan beban arah - x (kN/m<sup>2</sup>)

$W_{(bal) y}$  = gaya perimbangan beban arah - y (kN/m<sup>2</sup>)

$P_{e(x)}$  = gaya prategang efektif arah - x (kN)

$P_{e(y)}$  = gaya prategang efektif arah - y (kN)

$P_{o(x)}$  = gaya prategang awal tendon arah - x (kN)

$P_{o(y)}$  = gaya prategang awal tendon arah - y (kN)

$e_x$  = eksentrisitas tendon terhadap titik berat penampang arah - x (mm)

$e_y$  = eksentrisitas tendon terhadap titik berat penampang arah - y (mm)

$L_x$  = panjang bentang bersih arah - x (m)

- $L_y$  = panjang bentang bersih arah - y (m)
- $b$  = lebar penampang pelat beton yang ditinjau ( $m^2$ )
- $h$  = tinggi penampang pelat bersih (mm)
- $c_x$  = jarak titik berat penampang pelat arah - x (mm)
- $c_y$  = jarak titik berat penampang pelat arah - y (mm)
- $I_c$  = momen inersia penampang pelat beton ( $m^4$ )
- $\alpha_x$  = koefisien momen arah - x
- $\alpha_y$  = koefisien momen arah - y
- $M_{L(x)}$  = momen akibat beban hidup arah - x (kN-m)
- $M_{L(y)}$  = momen akibat beban hidup arah - y (kN-m)
- $M_{D(x)}$  = momen akibat beban mati total arah - x (kN-m)
- $M_{D(y)}$  = momen akibat beban mati total arah - y (kN-m)
- $f_t(x)$  = tegangan yang terjadi pada serat atas penampang pelat arah - x  
(Mpa)
- $f_b(x)$  = tegangan yang terjadi pada serat bawah penampang pelat arah - x  
(Mpa)
- $f_t(y)$  = tegangan yang terjadi pada serat atas penampang pelat arah - y  
(Mpa)
- $f_b(y)$  = tegangan yang terjadi pada serat bawah penampang pelat arah - y  
(Mpa)

### 3.6 Analisis Lentur terhadap Tegangan Ijin pada Pelat Beton Prategang

Penampang pelat beton prategang yang menerima aksi lentur harus memenuhi batas-batas tegangan ijin yang telah ditentukan, baik itu tegangan ijin beton maupun tegangan ijin baja prategang.

Untuk pelat beton prategang yang telah mengalami kehilangan gaya prategang mempunyai tegangan rata-rata pada penampang beton sebesar 0,86 Mpa sampai 3,5 Mpa, seperti yang telah ditetapkan oleh Antoine E. Naaman 1982 yang didasarkan ketentuan-ketentuan ACI-Code. Sedangkan tegangan beton yang diijinkan oleh ACI-Code untuk pelat beton prategang ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Tegangan-tegangan ijin beton yang disyaratkan dalam batang-batang lentur prategang

<p>Tegangan pada beton sesaat setelah terjadinya penyaluran gaya-gaya prategang, sebelum terjadinya kehilangan gaya prategang yang tergantung pada waktu, tidak boleh melebihi ketentuan-ketentuan berikut ini :</p>	
<p>a. tegangan serat terluar tekan</p>	$0,60 \cdot f'_{ci}$
<p>b. tegangan serat terluar tarik, kecuali seperti yang diijinkan dalam ketentuan (c)</p>	$0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}}$
<p>c. tegangan tarik serat terluar pada ujung-ujung batang atau pada batang-batang statis tertentu</p>	$0,50 \cdot \sqrt{f'_{ci}}$
<p>Pada daerah-daerah dimana tegangan tariknya melampaui harga-harga ini, dapat diberikan tambahan tulangan (biasa atau prategang), untuk memikul gaya tarik total pada beton yang dihitung berdasarkan anggapan bahwa penampangnya tidak melampaui retak.</p>	
<p>Tegangan-tegangan beton pada beban kerja, setelah diperhitungkan adanya kehilangan gaya-gaya prategang yang terjadi, tidak boleh melampaui ketentuan-ketentuan berikut :</p>	

a. tegangan tekan pada serat terluar	$0,45 \cdot f_c$
b. tegangan serat luar pada daerah tarik yang mengalami prategang	$0,50 \cdot \sqrt{f_c}$
c. tegangan serat terluar pada daerah tarik batang yang mengalami prategang, kecuali untuk sistem pelat dua arah, yang analisisnya didasarkan pada penampang transformasi yang mengalami retak serta pada hubungan momen lenturan dua arah, menunjukkan bahwa lenturan jangka pendek dan jangka panjang sesuai dengan batasan-batasan yang dikemukakan pada pedoman.	$\sqrt{f_c}$
Tegangan-tegangan yang diijinkan pada beton seperti yang dikemukakan di atas dapat dilampaui besarnya apabila melalui percobaan dan analisis struktur dapat ditunjukkan bahwa penampilan dari struktur tidak akan dirugikan.	

Sumber : Tim Editor dan Penerjemah ITB (George Winter dan Arthur H. Nilson)

Sedangkan tegangan ijin baja prategang yang disyaratkan oleh ACI-Code ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.4 Tegangan ijin baja partegang yang disyaratkan

Tegangan-tegangan baja tidak boleh melebihi :	
a. akibat gaya penjangkaran tendon	$0,94 \cdot f_{py} \leq 0,80 \cdot f_{pu}$
b. setelah pelimpahan gaya prategang	$0,82 \cdot f_{py} \leq 0,74 \cdot f_{pu}$
c. tendon pasca-tarik setelah penjangkaran tendon	$0,70 \cdot f_{pu}$
dimana : $f_{py} = 0,85 \cdot f_{pu}$ $f_{py} = 0,90 \cdot f_{pu}$ untuk baja dengan relaksasi rendah	

Sumber : Edward G. Nawy, 1996

### **3.7 Analisis Lentur pada Saat Kekuatan Batas (Ultimit) dan Saat Kekuatan Layan**

Perencanaan komponen struktur pelat beton prategang direncanakan sedemikian rupa sehingga masih mempunyai keamanan serta cadangan kekuatan untuk menahan beban eksternal yang bekerja. Dan tegangan-tegangan yang tersedia tidak melebihi dari tegangan-tegangan yang terjadi, sehingga tidak timbul retak lentur yang berlebihan pada penampang sewaktu mendukung beban kerja.

Timbulnya tegangan-tegangan lentur tersebut diakibatkan oleh adanya momen eksternal, sehingga hal itu merupakan faktor yang penting didalam merencanakan penampang struktur pelat beton prategang.

Proses perencanaan dan analisis umumnya dimulai dengan memenuhi persyaratan terhadap lentur itu sendiri, kemudian terhadap persyaratan kapasitas geser, defleksi dan kapasitas retak lentur.

#### **3.7.1 Pada Saat Kekuatan Batas (Ultimit)**

Ada beberapa kriteria didalam merencanakan pelat beton prategang pada keadaan batas (ultimit) menurut N. Krisna Raju, 1989 adalah sebagai berikut ini.

1. Keruntuhan akibat lentur, geser, puntir atau kombinasinya pada satu atau lebih dari penampang kritis.
2. Pecahnya blok ujung (end block) pada struktur beton prategang.
3. Keruntuhan bantalan pada tumpuan, ankur atau akibat beban terpasang yang terpusat.
4. Keruntuhan tulangan akibat rekatan dan ankur.

5. Keruntuhan sambungan antara elemen-elemen pracetak dan yang dicor ditempat (cast in situ).
6. Keruntuhan akibat ketidakstabilan elastis batang.

Kekuatan batas (ultimit) dihitung dengan menggunakan beban-beban karakteristik yang telah ditetapkan oleh ACI-Code, yaitu beban-beban eksternal yang telah dikalikan dengan faktor-faktor beban sesuai kondisi pembebanannya. Adapun besarnya faktor-faktor beban dan kondisi pembebanan yang ditetapkan menurut ACI-Code, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3.5 Faktor-faktor beban karakteristik dan kombinasinya

Kombinasi beban	Faktor Beban
Akibat beban hidup dan mati	$U = 1,4D + 1,7L$
Akibat beban hidup, mati dan beban angin	$U = 0,75(1,4D + 1,7L + 1,7W)$ $U = 0,90D + 1,3W$ $U = 1,4D + 1,7L$
Akibat beban hidup, mati dan beban gempa	$U = 0,75(1,4D + 1,7L + 1,87E)$ $U = 0,9D + 1,43E$ $U = 1,4D + 1,7L$
Akibat beban hidup, mati dan tekanan tanah	$U = 1,4D + 1,7L + 1,7H$ $U = 0,9D + 1,7H$ $U = 1,4D + 1,7L$
Akibat beban-beban khusus : - penurunan - rangkai dan susut - perbedaan suhu	$U = 0,75(1,4D + 1,4T + 1,7L)$ $U = 1,4(D + T)$

Sumber : Arthur H. Nilson, 1987

Selain faktor-faktor dan kombinasi beban yang menentukan dalam merencanakan pelat beton prategang, juga harus diperhitungkan faktor reduksi

kekuatan yaitu dengan membagi kuat momen batas (ultimit) terhadap faktor tersebut, sehingga didapatkan kuat momen nominal yang terjadi. Sedangkan kuat momen nominal yang terjadi pada penampang pelat beton prategang harus lebih kecil atau sama dengan kuat momen nominal yang direncanakan. Menurut peraturan ACI-Code, besarnya faktor reduksi kekuatan momen batas (ultimit) ditetapkan, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel 3.6 Faktor reduksi kekuatan momen batas (ultimit)

Jenis Struktur	Faktor Reduksi ( $\phi$ )
Lentur tanpa beban aksial	0,90
Beban aksial dan beban aksial dengan lentur	0,90
- Aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur - Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur	
- sengkang spiral	0,75
- sengkang biasa	0,70
Geser dan torsi	0,85
Tumpuan pada beton	0,70

Sumber : Arthur H. Nilson, 1987

Untuk lebih jelasnya, besar momen yang terjadi pada masing-masing arah bentang pelat dapat ditunjukkan pada rumus dibawah ini.

arah - x

$$M_{u(x)} = (\alpha_x \cdot (1,4 \cdot W_{D-tot} + 1,7 \cdot W_L) \cdot L_x^2) \dots \dots \dots (3.11.a)$$

$$M_{n(x)} = \frac{M_{u(x)}}{\phi} \dots \dots \dots (3.11.b)$$

arah - y

$$M_{u(y)} = (\alpha_y \cdot (1,4 \cdot W_{D-tot} + 1,7 \cdot W_L) \cdot L_y^2) \dots\dots\dots (3.12.a)$$

$$M_{n(y)} = \frac{M_{u(y)}}{\phi} \dots\dots\dots (3.12.b)$$

dengan :

$M_{u(x)}$  = momen batas runtuh pelat yang terjadi pada arah - x (kN-m)

$M_{u(y)}$  = momen batas runtuh pelat yang terjadi pada arah - y (kN-m)

$M_{n(x)}$  = momen nominal pelat yang terjadi pada arah - x (kN-m)

$M_{u(y)}$  = momen nominal pelat yang terjadi pada arah - y (kN-m)

$W_{D-tot}$  = beban mati total (kN/m<sup>2</sup>)

$W_L$  = beban hidup (kN/m<sup>2</sup>)

$\alpha_x$  = koefisien momen batas (ultimit) pada arah - x

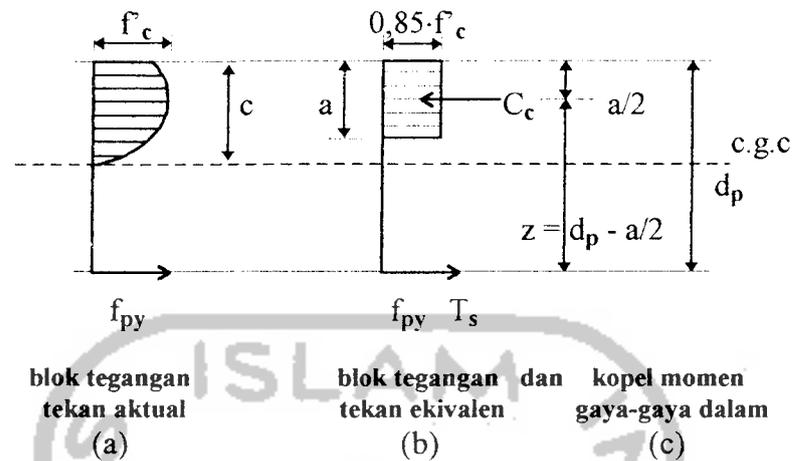
$\alpha_y$  = koefisien momen batas (ultimit) pada arah - y

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan

$L_x$  = panjang bentang arah - x (m)

$L_y$  = panjang bentang arah - y (m)

Kuat lentur yang tersedia pada pelat beton prategang disebabkan oleh adanya mekanisme tegangan-tegangan dalam yang timbul di dalam pelat itu sendiri, sehingga gaya-gaya dalam yang ada dapat mengimbangi pengaruh lentur yang terjadi. Untuk lebih jelasnya dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Blok tegangan ekuivalen Whitney

Dari keterangan gambar di atas, keseimbangan gaya-gaya dalam yang terjadi pada penampang pelat beton adalah sebagai berikut :

$$C_c = T_s$$

dimana :

$$C_c = 0,85 \cdot f_c \cdot b \cdot a \quad \dots \dots \dots (3.13.a)$$

$$T_s = A_{ps} \cdot f_{ps} \quad \dots \dots \dots (3.13.b)$$

maka diperoleh :

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 \cdot f_c \cdot b} \quad \dots \dots \dots (3.14)$$

“b” adalah lebar daerah tekan pelat, dengan  $a = \beta_1 \cdot c$  sehingga akan diperoleh :

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad \dots \dots \dots (3.15)$$

Untuk mendapatkan harga  $\beta_1$ , dilakukan pendekatan terhadap kuat desak beton sebagai berikut :

jika  $f'_c \leq 30$  Mpa maka  $\beta_1 = 0,85$

jika  $30 < f'_c \leq 55$  Mpa maka  $\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f'_c - 30)$

jika  $f'_c > 55$  Mpa maka  $\beta_1 = 0,65$

Menurut peraturan ACI-Code, tegangan baja pada pelat prategang untuk tendon yang tak terekat, adalah sebesar :

a. Untuk pelat dengan  $L/h \leq 35$

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{100 \cdot \rho_p} \dots \dots \dots (3.16.a)$$

dengan :  $f_{ps} \leq f_{py}$  dan  $f_{ps} \leq f_{pe} + 400$

b. Untuk pelat dengan  $L/h \geq 35$

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{300 \cdot \rho_p} \dots \dots \dots (3.16.b)$$

dengan :  $f_{ps} \leq f_{py}$  dan  $f_{ps} \leq f_{pe} + 200$

dengan :

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p} \dots \dots \dots (3.17)$$

Sedangkan tegangan baja untuk pelat beton prategang dengan tendon yang terekat menurut ACI-Code adalah sebesar :

a. Untuk pelat dengan tulangan prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left( 1 - 0,5 \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c} \right) \dots \dots \dots (3.18.a)$$

b. Untuk pelat dengan tulangan non-prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left( \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d_s}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right) \right] \dots \dots \dots (3.18.b)$$

dengan :

$$\gamma_p = 0,40 \quad \text{jika} \quad \frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,85$$

$$\gamma_p = 0,28 \quad \text{jika} \quad \frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,90$$

$$\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f_c} \quad \text{dengan} \quad \rho = \frac{A_s}{b \cdot d_s}$$

$$\omega' = \rho' \cdot \frac{f_y}{f_c} \quad \text{dengan} \quad \rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d_s}$$

Dengan demikian akan didapatkan kapasitas momen nominal sebesar :

a. Untuk pelat dengan tulangan prategang

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - a / 2) \dots \dots \dots (3.19.a)$$

Kekuatan momen batas (ultimit) diperoleh dari momen nominal rencana

dibagi dengan faktor reduksi sebesar  $\phi$ , maka :

$$M_u = \frac{M_n}{\phi} \dots\dots\dots (3.19.b)$$

b. Untuk pelat dengan tulangan non-prategang

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - a / 2) + A_s \cdot f_y \cdot (d_{ps} - a / 2) \dots\dots\dots (3.20.a)$$

Kekuatan momen batas (ultimit) rencana diperoleh dari momen nominal rencana dibagi dengan faktor reduksi sebesar  $\phi$ , maka :

$$M_u = \frac{M_n}{\phi} \dots\dots\dots (3.20.b)$$

dengan :

$C_c$  = gaya tekan internal akibat beton (kN)

$T_s$  = gaya tarik internal akibat baja (kN)

$f_c$  = kuat tekan beton (Mpa)

$a$  = tinggi blok tegangan tekan ekuivalen (mm)

$b$  = lebar pias pelat beton prategang (m')

$c$  = jarak serat terluar pelat beton terhadap titik berat penampang (mm)

$L$  = panjang bentang pelat (m)

$h$  = tinggi penampang pelat beton (mm)

$f_y$  = tegangan leleh baja tulangan non-prategang (Mpa)

$f_{py}$  = tegangan leleh baja tulangan prategang (Mpa)

$f_{ps}$  = tegangan baja tulangan prategang pada taraf kuat nominal (Mpa)

$f_{pe}$  = tegangan tekan pada beton akibat gaya prategang efektif (Mpa)

$f_{pu}$  = kuat tarik tendon prategang (Mpa)



- $A_{ps}$  = luas penampang baja tulangan prategang ( $\text{mm}^2$ )  
 $A_s$  = luas penampang baja tulangan tarik non-prategang ( $\text{mm}^2$ )  
 $A_s'$  = luas penampang baja tulangan tekan non-prategang ( $\text{mm}^2$ )  
 $\rho_p$  = rasio tulangan prategang  
 $\rho$  = rasio tulangan tarik non-prategang  
 $\rho'$  = rasio tulangan tekan non-prategang  
 $\gamma_p$  = faktor jenis tendon prategang  
 $d_p$  = jarak serat luar penampang pelat terhadap titik berat tendon (mm)  
 $d_{ps}$  = jarak serat luar penampang pelat terhadap titik berat tulangan non-prategang (mm)  
 $\omega = \omega'$  = rasio tulangan prategang  
 $M_n$  = momen nominal rencana (kN-m)  
 $M_u$  = momen batas (ultimit) rencana (kN-m)  
 $\phi$  = faktor reduksi kekuatan  
 $\beta_1$  = faktor reduksi tinggi blok tegangan tekan ekuivalen beton

### 3.7.2 Pada Saat Kekuatan Layan

Pada pelat beton prategang yang direncanakan, defleksi yang terjadi diperhitungkan hanya pada saat beban hidup telah bekerja. Dalam hal ini kekakuan struktur sangat penting karena hal tersebut akan membantu membatasi lendutan yang terjadi. Kekakuan struktur tersebut dapat mempengaruhi kekuatan

dan kemampuan penampang beton terhadap lentur, sehingga diusahakan tidak akan dapat terjadi lendutan yang besar pada saat beban kerja.

Untuk itu kontrol terhadap lendutan sangat penting didalam merencanakan suatu struktur pelat beton prategang dengan alasan-alasan sebagai berikut ini.

1. Lendutan yang berlebihan pada suatu pelat beton prategang tidak mudah dilihat, sehingga membuat pelat menjadi tidak sesuai untuk pemakaian.
2. Lendutan yang besar akibat pengaruh dinamis dan akibat pengaruh beban yang berubah-ubah dapat mengurangi kenyamanan pemakainya.
3. Lendutan yang berlebihan cenderung menyebabkan kerusakan pada permukaan pelat tersebut dan struktur-struktur yang berkaitan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi lendutan pada pelat beton prategang adalah sebagai berikut ini.

1. Beban terpasang dan berat sendiri.
2. Besarnya gaya prategang.
3. Profil tendon.
4. Momen inersia potongan melintang.
5. Modulus elastis beton.
6. Susut, rangkai, dan relaksasi tegangan baja.
7. Kondisi penjepitan.

Menurut peraturan ACI-Code lendutan maksimum yang disyaratkan adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 3.7 berikut ini.

Tabel 3.7 Lendutan maksimum yang diijinkan

Tipe struktur	Lendutan yang harus dipertimbangkan	Batas lendutan
- Atap datar yang tidak memikul atau dipasang pada elemen-elemen non-struktural yang cenderung rusak oleh lendutan yang besar.	- Lendutan seketika akibat beban hidup.	<u>Bentang</u> 180
- Lantai yang tidak memikul atau dipasang pada elemen-elemen non-struktural yang cenderung rusak oleh lendutan yang besar.	- Lendutan seketika akibat beban hidup.	<u>Bentang</u> 360
- Struktur atap atau lantai yang memikul atau dipasang pada elemen-elemen non-struktural yang cenderung rusak oleh lendutan yang besar.	- Lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen - elemen non-struktural, jumlah lendutan jangka panjang akibat semua beban secara terus - menerus dan lendutan seketika akibat suatu beban hidup	<u>Bentang</u> 480
- Struktur atap atau lantai yang memikul atau dipasang pada elemen-elemen non-struktural yang cenderung tidak rusak oleh lendutan yang besar.		<u>Bentang</u> 240

Sumber : N. Krisna Raju, 1989

Dalam analisis ini besarnya lendutan akibat beban hidup yang terjadi pada pelat untuk masing-masing arah adalah sebagai berikut :

arah - x

$$\Delta_x = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{L(x)} \cdot L_x^2}{E_c \cdot I_c} \dots \dots \dots (3.21.a)$$

arah - y

$$\Delta_y = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_{L(y)} \cdot L_y^2}{E_c \cdot I_c} \dots\dots\dots (3.21.b)$$

dengan :

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c} \dots\dots\dots (3.22)$$

Sedangkan lendutan rata-rata dari kedua arah bentang tersebut adalah :

$$\Delta_{rt} = \frac{\Delta_x + \Delta_y}{2} \dots\dots\dots (3.23)$$

Adapun lendutan maksimum yang diijinkan adalah sebesar :

$$\Delta' = \frac{L_x}{360} \dots\dots\dots (3.24)$$

dengan :

$\Delta'$  = lendutan yang diijinkan (mm)

$\Delta_x$  = lendutan yang terjadi pada arah -x (mm)

$\Delta_y$  = lendutan yang terjadi pada arah -y (mm)

$E_c$  = modulus elastis beton (Mpa)

### 3.8 Kapasitas Geser

Kekuatan tarik pada beton harus diperhitungkan secara teliti, karena sifat beton yang tidak tahan/kuat terhadap pengaruh tarik. Kekuatan tarik beton yang

cenderung lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan tekannya, maka kontrol terhadap pengaruh geser merupakan hal yang sangat penting.

Perilaku pelat beton prategang pada keadaan batas (ultimit) akibat pengaruh geser berbeda dengan keruntuhan akibat pengaruh lentur. Akibat pengaruh geser tersebut beton akan mengalami hancur secara langsung tanpa adanya gejala-gejala terlebih dahulu. Retak diagonal akibat geser juga akan lebih lebar dibandingkan dengan retak yang diakibatkan oleh pengaruh lentur.

Suatu tendon dengan eksentrisitas yang berbeda akan bekerja sebagai suatu kabel gantung, berfungsi untuk meringankan sebagian beban-beban eksternal yang mengakibatkan tegangan lentur dan tegangan geser. Jadi gaya lintang yang ditahan oleh tendon itu dapat dihitung, baik sebagai komponen vertikal dari tarikan tendon atau sebagai geseran yang ditimbulkan oleh perimbangan beban. Untuk itu kapasitas geser yang terjadi pada struktur pelat beton prategang sangat perlu dilakukan analisis yang teliti. Analisis terhadap pengaruh geser pada perencanaan ini didasarkan pada ketentuan-ketentuan yang telah ditetapkan oleh ACI-Code. Adapun ketentuan-ketentuan terhadap batas tahanan geser nominal yang terjadi pada struktur pelat yang mempunyai gaya prategang efektifnya tidak kurang dari 40% dari kekuatan tarik tendon oleh ACI-Code ditetapkan sebagai berikut ini.

$$V_c = \left( \frac{1}{20} \cdot \sqrt{f'_c} + \frac{5 \cdot V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d_p \dots \dots \dots (3.25)$$

dengan :

$$\frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \leq 1,0$$

$$V_c < (0,4 \cdot \sqrt{f'_c}) \cdot b_w \cdot d_p \dots\dots\dots (3.26.a)$$

$$V_c \geq \left(\frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c}\right) \cdot b_w \cdot d_p \dots\dots\dots (3.26.b)$$

Sedangkan gaya geser yang terjadi pada pelat beton prategang dua arah khususnya pada panel tunggal menurut Edward G. Nawy (1996) adalah sebagai berikut ini.

arah - x

$$V_{u(x)} = \frac{1}{3} \cdot W_u \cdot L_x \dots\dots\dots (3.27.a)$$

arah - y

$$V_{u(y)} = \left(\frac{k \cdot W_u \cdot L_x}{2 \cdot k + 1}\right) \dots\dots\dots (3.27.b)$$

Sehingga kapasitas gaya geser yang terjadi harus kurang dari gaya geser yang diijinkan, seperti ditunjukkan pada rumus di bawah ini.

$$V_{u(x,y)} \leq V_u' = \phi \cdot V_c \dots\dots\dots (3.28)$$

dengan :

$V_c$  = gaya geser yang disyaratkan (kN)

$V_u'$  = gaya geser batas (ultimit) yang disyaratkan (kN)

$V_{u(x)}$  = gaya geser batas (ultimit) yang terjadi pada arah - x (kN)

$V_{u(y)}$  = gaya geser batas (ultimit) yang terjadi pada arah - y (kN)

$W_u$  = beban batas (ultimit) yang terjadi ( $\text{kN/m}^2$ )

$M_u$  = momen batas (ultimit) yang terjadi (kN-m)

$b_w$  = lebar pias yang ditinjau ( $\text{m}^2$ )

$d_p$  = jarak serat terluar penampang beton dengan titik berat tendon (mm)

$L_x$  = panjang bentang arah - x (m)

$k$  = perbandingan antara bentang arah - y dengan arah - x

$\phi$  = faktor reduksi kekuatan

### 3.9 Kapasitas Momen Retak

Terjadinya retak pada suatu elemen struktur diakibatkan karena terlampauinya tegangan tarik bahan. Dalam beberapa struktur, retak masih diijinkan dalam batas-batas tertentu sepanjang masih menjamin keamanan struktur. Menurut peraturan Inggris, India, dan CEB-FIP struktur beton prategang dikelompokkan kedalam tiga kelas, yaitu :

1. Struktur kelas I yaitu suatu struktur yang tidak mengijinkan adanya tegangan tarik dan oleh karena itu tidak akan terjadinya retakan akibat beban kerja. Pada kasus ini sering disebut prategang penuh ( Full Prestressed ).
2. Struktur kelas II yaitu suatu struktur dengan tegangan tariknya terbatas tetapi tidak diperkenankan adanya retakan yang terlihat akibat beban

kerja. Tegangan tarik dibatasi sampai nilai-nilai yang lebih kecil daripada modulus retak beton. Pada kasus ini sering disebut prategang sedang ( Moderately Prestressed ).

3. Struktur kelas III yaitu suatu struktur dengan tegangan tarik dan retakan diperkenankan akibat beban kerja. Pada kasus ini sering disebut prategang sebagian ( Partially Prestressed ).

Keadaan yang menunjukkan terjadinya retak adalah perubahan tegangan pada serat bawah, dimulai dari timbulnya kelebihan tegangan tarik akibat gaya prategang dan menjadi tegangan tarik sebesar modulus retak akibat beban eksternal. Momen yang menyebabkan retak-retak rambut dianalisis dengan metode perimbangan beban. Analisis ini berdasarkan anggapan bahwa retak mulai terjadi pada saat tegangan ekstrim mencapai modulus retak, sedangkan modulus retak yang disyaratkan ACI-Code adalah sebesar :

$$f_r = 0,620 \cdot \sqrt{f_c} \dots \dots \dots (3.29)$$

Momen retak lentur dihitung dengan persamaan tegangan serat tarik ekstrim berdasarkan pada penampang homogen. Sehingga dapat ditulis :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M \cdot c}{I_c} \dots \dots \dots (3.30)$$

karena  $f_b = f_r$ , maka :

$$f_r = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{M \cdot c}{I_c} \dots \dots \dots (3.31)$$

sehingga persamaan momen retak lentur adalah :

$$\frac{M_{cr} \cdot c}{I_c} = f_r + \frac{P_e}{A_c}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_c}{c} + \frac{P_e \cdot I_c}{A_c \cdot c}$$

$$M_{cr} = S_b \cdot \left( f_r + \frac{P_e}{A_c} \right) \dots \dots \dots (3.32)$$

dengan :

$$S_b = \frac{I_c}{c} \dots \dots \dots (3.33)$$

Sehingga momen retak lentur yang terjadi harus kurang dari momen batas (ultimit) rencana, seperti ditunjukkan pada rumus di bawah ini :

$$\phi \cdot M_n \geq 1,2 \cdot M_{cr} \dots \dots \dots (3.34)$$

dengan :

$f_r$  = tegangan runtuh beton akibat lentur (Mpa)

$f_b$  = tegangan serat tarik beton akibat lentur (Mpa)

$M_{cr}$  = momen retak lentur yang terjadi (kN-m)

$S_b$  = modulus penampang beton serat tarik (mm<sup>3</sup>)

$c$  = titik berat penampang pelat beton (mm)

Tegangan tarik akibat lentur yang terjadi dalam beton, jika melampaui nilai modulus retaknya akan menghasilkan retak lentur penampang. Dalam kondisi retak beton prategang memerlukan perhatian khusus karena pemakaian baja mutu tinggi lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan. Selain hal itu yang lebih penting adalah kemampuan struktur akibat retak. Terjadinya retak sedapat mungkin dihindari karena menyangkut kemampuan struktur dan harus dilakukan analisis kondisi retak terhadap perilaku struktur yang berkaitan dengan keamanan struktur itu sendiri.

Ada beberapa parameter yang mempengaruhi lebar retak yang terjadi pada penampang elemen struktur, antara lain :

- a. Karakteristik permukaan tulangan tarik, termasuk tendon prategang dan batang baja non-prategang.
- b. Letak baja pada penampang.
- c. Tebal selimut beton.
- d. Rasio total luasan baja dengan beton.
- e. Kenaikan tegangan baja pada penampang batang yang dibebani.
- f. Kekuatan tarik beton.
- g. Dimensi dan bentuk batang.

Secara ideal metode yang mengevaluasi retak harus berhubungan dengan pengaruh setiap variabel diatas.