

# PERHITUNGAN LEBAR RETAK PADA BETON PRATEKAN PARSIAL DENGAN *UNIFIED APPROACH*

**Gideon Hadi Kusuma**

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra

**Vivi Sulistyowati Tjio, Pamuda Pudjisuryadi**

Alumni Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra

## ABSTRAK

Pada beton pratekan parsial, jarang dilakukan perhitungan lebar retak. Lebar retak dibatasi dengan melakukan pembatasan tegangan baja yang terjadi. Makalah ini memperkenalkan perhitungan lebar retak yang sudah dikembangkan di Amerika (ACI). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa lebar retak tidak hanya dipengaruhi tegangan saja, tetapi juga variabel lainnya. Dalam paper ini dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama untuk beton pratekan, pratekan parsial maupun beton bertulang biasa (*unified approach*), dibuat dan diperkenalkan alat bantu berupa grafik dan tabel.

Kata kunci: beton pratekan parsial, lebar retak, *unified approach*

## ABSTRACT

*In partially prestressed concrete, crack width is rarely calculated. The crack width was controlled only by limiting the steel stress. This paper introduced crack width calculations which has been developed in America (ACI). The calculations show that factor influencing crack width is not only the steel stresses, but there are some other variables. "Unified approach" is used to introduce design aids in the form of graphs and tables that can be used for partially prestressed, prestressed and reinforced concrete.*

*Keywords: partially prestressed concrete, crack width, unified approach*

## PENDAHULUAN

Peraturan Beton Indonesia, memakai rujukan dari berbagai peraturan yang ada, dan bukan tidak mungkin perubahan pada ACI, akan mengakibatkan perubahan pula pada peraturan beton Indonesia.

Perubahan yang mendasar dari ACI 318-89 menuju ACI 318-95 adalah penyatuan batasan untuk perhitungan balok dan kolom, beton bertulang biasa dan beton pratekan usulan dari Robert F. Mast [1]. Perhitungan penulangan balok dan kolom pada beton bertulang biasa dan beton pratekan telah dibahas dalam studi sebelumnya [2]. Dalam makalah ini akan dibahas perhitungan lebar

retak pada beton pratekan parsial dengan menggunakan prosedur perhitungan yang sama dengan beton bertulang biasa (*unified approach*).

Studi yang dilakukan meliputi konsep dan aplikasi perhitungan lebar retak pada elemen beton yang menerima beban lentur murni dan menerima kombinasi beban aksial tekan dan lentur. Studi ini juga meliputi pembuatan tabel dan grafik desain sebagai alat bantu perhitungan.

## TEORI DEKOMPRESI

Dekompresi adalah suatu kondisi dimana tegangan pada seluruh penampang beton yang ditinjau adalah nol, bila beban mati dan beban hidup tidak diperhitungkan. Tujuan dari dekompresi ini adalah untuk mengusahakan

---

**Catatan** : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Mei 2000. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Dimensi Teknik Sipil volume 2 nomor 2 September 2000

penampang beton pratekan yang ditinjau menjadi kondisi yang sama/identik dengan beton bertulang biasa, yaitu tidak ada tegangan bila tidak ada beban mati atau beban hidup.

Gaya dekompresi pada penampang beton pratekan adalah gaya fiktif yang dikerjakan pada tulangan pratekan dan non pratekan untuk mengeliminasi/menghilangkan tegangan pada beton, sementara beban mati dan beban hidup dianggap tidak bekerja.

Perhitungan dari gaya dekompresi cukup rumit karena gaya pratekan berubah sesuai dengan waktu selama susut dan rangkakan pada beton dan relaksasi tegangan pada baja pratekan masih terjadi. Definisi diatas dapat dilihat pada Gambar 1.

		TEGANGAN		REGANGAN	
		BETON	BAJA	BETON	BAJA
TEGANGAN SEBELUM GAYA PRATEKAN DILIMPahkan					
TEGANGAN SETELAH GAYA PRATEKAN BEKERJA					
TEGANGAN KARENA GAYA PRATEKANG EFEKTIF					
TEGANGAN KARENA GAYA PRATEKANG EFEKTIF TANPA BEBAN MATI					
BETON DALAM KEADAAN DEKOMPRESI					

Gambar 1. Tahap dekompresi beton

Dari Gambar 1, gaya dekompresi,  $P_{dc}$ , dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_{dc} = P_e - f_{cpe} A_{ps} n + P_s - f_{cse} A_{ns} n \quad (1)$$

dimana :

$f_{cpe}$  = tegangan beton di lokasi baja pratekang akibat gaya pratekan efektif dan beban mati.

$A_{ps}$  = adalah luas baja pratekang.

$n = E_s/E_c$ , rasio modulus baja terhadap beton.

$f_{cse}$  = tegangan beton di lokasi baja non-pratekang akibat gaya pratekan efektif dan beban mati.

$A_{ns}$  = luas baja non-pratekang.

Gaya pratekan efektif,  $P_e$ , dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_e = P_i + \Delta f_{ps} A_{ps} \quad (2)$$

Didalam rumus diatas  $P_i$  adalah gaya pratekan segera setelah pelimpahan gaya, sedangkan  $A_{ps}$  adalah luas baja pratekang. Kehilangan tegangan,  $\Delta f_{ps}$ , dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta f_{ps} = \frac{n f_{cpi} \phi_t + \epsilon_{sh} E_s + f_{re}}{1 + n(\rho_p + \rho_s)(1 + e^2 / r^2)(1 + 0.8\phi_t)} \quad (3)$$

Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja pratekan berkurang karena adanya susut dan rangkakan pada beton, oleh karena itu relaksasi intrinsik,  $f_{re}$ , dapat digantikan dengan  $f_{re}$  yang tereduksi yaitu  $\alpha_r$ . Koefisien  $\alpha_r$  dapat diperoleh dari Gambar 6. Pada grafik ini  $\alpha_r$  merupakan fungsi dari  $\beta = f_{psi}/f_{pu}$ , rasio dari tegangan initial dengan kuat tarik baja pratekang, dan  $\Omega = \Delta f_{ps}/f_{psi}$ , sedangkan  $\Delta f_{ps}$  adalah kehilangan tegangan karena terjadinya susut dan rangkakan, dan diberikan dengan rumus:

$$\Delta f_{ps} = \frac{n f_{cpi} \phi_t + \epsilon_{sh} E_s}{1 + n(\rho_p + \rho_s)(1 + e^2 / r^2)(1 + 0.8\phi_t)} \quad (4)$$

Gaya pada baja non-pratekang,  $P_s$ , dapat dicari dengan rumus:

$$P_s = A_{ns} \Delta f_s \quad (5)$$

Dimana  $\Delta f_s$  adalah perubahan tegangan pada baja non pratekan karena terjadinya susut dan rangkakan, yang dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta f_s = \frac{n f_{csi} \phi_t + \epsilon_{sh} E_s}{1 + n(\rho_p + \rho_s)(1 + e^2 / r^2)(1 + 0.8\phi_t)} \quad (6)$$

didalam rumus (3), (4) dan (6):

$f_{cpi}$  = tegangan beton di lokasi baja pratekang akibat gaya pratekan inisial dan berat sendiri elemen.

$f_{csi}$  = tegangan beton di lokasi baja non-pratekang akibat gaya pratekan inisial dan berat sendiri elemen.

$\phi_t$  = koefisien rangkakan.

$\epsilon_{sh}$  = susut bebas.

$\rho_p$  = rasio baja pratekang.

$\rho_s$  = rasio baja non pratekang.

$e$  = eksentrisitas baja pratekang terhadap titik berat penampang beton bruto.

$r$  = jari-jari girasi penampang beton bruto.

Tegangan baja setelah dikompresi dapat diperoleh dengan analisa tegangan pada penampang retak transformasi yang menerima beban aksial tekan sebesar  $P_{dc}$  dan momen kerja  $M_s$ . Tegangan baja setelah dekompresi tersebut sama dengan  $n$  kali tegangan beton pada lokasi baja, yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Gaya dekompresi diasumsikan bekerja pada lokasi baja pratekan, sehingga tegangan baja setelah dikompresi yang terjadi pada kombinasi titik berat baja adalah:

$$f_s = n \left[ \frac{P}{A_{cr}} + \frac{M_s + P(d_{ps} - y_{cr})}{I_{cr}} (d - y_{cr}) \right] \quad (7)$$

dimana :

$P$  = gaya pratekanan.

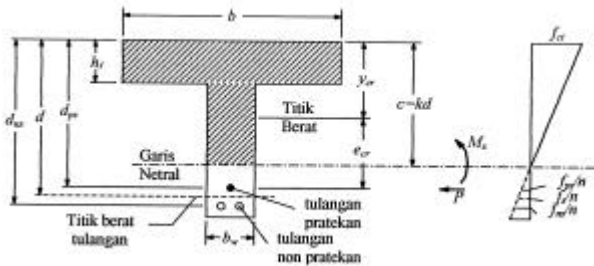
$A_{cr}$  = luas penampang retak transformasi

$M_s$  = momen maksimum yang bekerja.

$d_{ps}$  = tinggi efektif baja prategang.

$y_{cr}$  = tinggi titik berat penampang retak transformasi.

$I_{cr}$  = momen inersia penampang retak transformasi.



Gambar 2. Tegangan setelah retak pada beton pratekan

Tinggi efektif kombinasi baja prategang dan baja non-prategang,  $d$ , adalah:

$$d = \frac{A_{ps} d_{ps} + A_{ns} d_{ns}}{A_{ps} + A_{ns}} \quad (8)$$

dimana:

$A_{ns}$  = luas baja non-prategang.

$d_{ns}$  = tinggi efektif baja non-prategang.

Dengan mensubstitusikan  $p = Pd_{ps}/M_s$  dan  $\alpha = M_s/bd^2$ , serta mengasumsikan  $d_{ps} \approx d$  rumus (7) dapat diubah menjadi:

$$\frac{f_s}{n\alpha} = p \frac{bd}{A_{cr}} + \frac{1 + p(1 - y_{cr}/d)}{I_{cr}/bd^3} (1 - y_{cr}/d) \quad (9)$$

Seluruh parameter disebelah kanan dapat dinyatakan dengan  $p$ ,  $n$ ,  $\rho$ ,  $\alpha_1$ , dan  $\alpha_2$ , dimana  $\alpha_1 = b_w/b$ , dan  $\alpha_2 = h_f/(na)$  dapat dilihat pada Tabel A.

## LEBAR RETAK

Lebar retak dipengaruhi oleh faktor tegangan baja setelah dekompresi, tipe tulangan, selimut beton, luas beton tarik, distribusi tulangan pada daerah tarik, mutu beton, metode pratekanan, pembebanan, luas total baja.

Ada 2 rumus untuk menghitung lebar retak, yaitu [3]:

1. Rumus Empiris
2. Rumus Gergely-Lutz

### 1. Rumus Empiris.

$$w_{maks} = k \cdot f_s \cdot d_c \cdot \left( \frac{A_t}{A_s} \right)^n \quad (10)$$

dimana  $k$  adalah koefisien yang tergantung tipe tulangan pratekan dan non pratekan,  $d_c$ , selimut beton,  $A_t$ , luas beton dan  $A_s$  luas baja total, sedangkan  $n$ , konstanta dari regresi. Nilai  $n = 1/2$  merupakan harga terbaik. Nilai  $k$  ditabelkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai  $k$  untuk rumus Empiris [3]

Kategori	Tipe Baja	$k$ ( $10^{-6}$ )
1	Baja Ullir - Strand	2.55
2	Baja Ullir - Wire	3.51
3	Strand saja	2.65
4	Wires saja	4.5

### 2. Rumus Gergely-Lutz

$$W_{maks} = k_1 \cdot f_s \cdot (d_c \cdot A)^{1/3} \quad (11)$$

Dimana  $k_1$  adalah koefisien yang tergantung kepada tipe tulangan pratekan dan non pratekan ( $mm^2/N$ ) (Tabel 2)

Tabel 2. Nilai  $k_1$  untuk Rumus Gergely-Lutz [3]

Kategori	Tipe Baja	$k_1$ ( $10^{-6}$ )
1	Deformed Bar - Strand	13.7
2	Deformed Bar - Wire	20.3
3	Strand only	22.5
4	Wires only	37.2
5	Unbonded Tendon	25

Selanjutnya untuk desain, ACI merekomendasikan  $w_{maks}$  yang dihitung dikalikan faktor pembesaran 1,25 dan batasan lebar retak adalah 0,25 mm untuk elemen eksterior dan 0,3 mm untuk elemen interior.

**CONTOH PERHITUNGAN**

Sebuah balok persegi tertumpu sederhana dengan bentang 20 m (Gambar 3). Balok tersebut diberi tulangan pratekan dengan 10 strand 13 mm ( $A_{ps} = 990 \text{ mm}^2$ ). Beban mati,  $Q_D = 1400 \text{ kg/m}'$ , berat sendiri,  $Q_S = 940 \text{ kg/m}'$ , beban hidup,  $Q_L = 1000 \text{ kg/m}'$ . Gaya pratekan sebelum pelimpahan  $P_j = 1630 \text{ kN}$ .

Data material:

Beton:  $f'_c = 35 \text{ MPa}$ ,  $E_c = 28270 \text{ MPa}$ ,  $E_{ci} = 23483,6 \text{ MPa}$

Baja pratekan:  $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$

Baja non-pratekan:  $f_y = 400 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas baja  $E_s = 196500 \text{ MPa}$

Maka 
$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{196500}{28270} = 6.95$$

Koefisien rangkai:  $\phi_t = 1.25$

Regangan susut bebas:  $\epsilon_{sh} = -225 \times 10^{-6}$

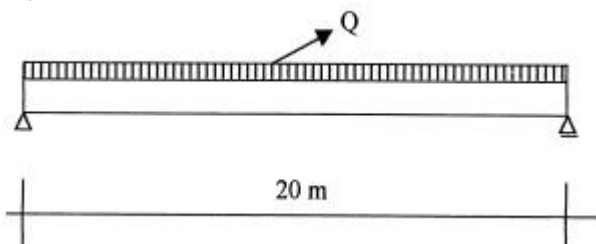
Relaksasi intrinsik:  $f_{re} = -333.449 \text{ MPa}$

Data penampang:

- $b = 400 \text{ mm}$
- $b_w = 400 \text{ mm}$
- $d_{ps} = 885 \text{ mm}$
- $d_{ns} = 950 \text{ mm}$
- $A_s = 400000 \text{ mm}^2$
- $y_t = 500 \text{ mm}$
- $y_b = 500 \text{ mm}$
- $e = 385 \text{ mm}$
- $r = 288.675 \text{ mm}$
- $I_c = 3.33 \times 10^{10} \text{ mm}^4$

Momen yang bekerja:

- $M_D = 700 \text{ kNm}$
- $M_L = 500 \text{ kNm}$
- $M_{BS} = 470 \text{ kNm}$
- $M_s = 1200 \text{ kNm}$



Gambar 3. Potongan memanjang

**Mendesain tulangan non pratekan**

$$M_U = 1.2 M_D + 1.6 M_L = 1640 \text{ kNm}$$

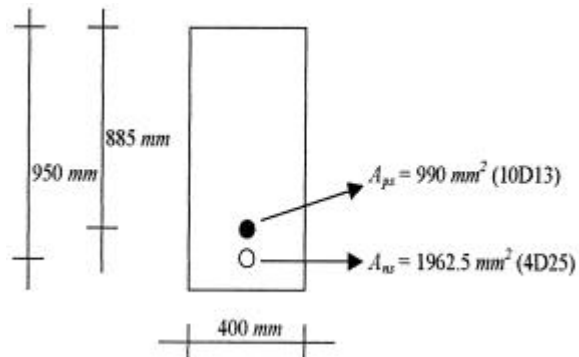
$$\frac{M_U}{bd^2} = \frac{1640}{400 \times 0.928^2} = 4760.9 \text{ kN/m}^2$$

dari Tabel B didapat  $w_{eq} = 0.0167436$

$$\sigma_{pu} = 0.9529865 \times 1860 = 1772.55 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{ns} = \frac{w_{eq} b d f_y - A_{ps} \sigma_{pu}}{f_y} = \frac{0.0167438 \times 400 \times 928 \times 400 - 990 \times 1772.55}{400} = 1828.163 \text{ mm}^2$$

digunakan tulangan non pratekan 4D25



Gambar 4. Penampang Melintang Balok

Memeriksa asumsi tinggi efektif d

$$d = \frac{A_{ps} d_{ps} + A_{ns} d_{ns}}{A_{ps} + A_{ns}} = \frac{990 \times 885 + 1962.5 \times 950}{990 + 1962.5} = 928.205 \text{ mm (OK)}$$

Dengan mengacu pada diagram alir, Gambar 5. maka penyelesaian kasus di atas adalah sebagai berikut:

**Kehilangan tegangan karena perpendekan elastis**

$P_j = 1630 \text{ kN}$

$$e_s = \frac{A_{ps} (d_{ps} - y_t) + A_{ns} (d_{ns} - y_t)}{A_{ps} + A_{ns}} = \frac{990 (885 - 500) + 1962.5 (950 - 500)}{990 + 1962.5} = 428.205 \text{ mm}$$

$$n_i = \frac{E_s}{E_{ci}} = \frac{196500}{23483.6} = 8.368$$

Tegangan beton pada titik berat baja segera setelah pelimpahan gaya pratekan dengan asumsi  $P_i = 0.9P_j = 0.9 \times 1630000 = 1467000 \text{ N}$ :

$$f_{cr} = \frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \times e \times e_s}{I_c} - \frac{M_{BS} e_s}{I_c}$$

$$= \frac{14670000}{400000} + \frac{1467000 \times 385 \times 428.205}{3.33 \times 10^{10}} - \frac{470 \times 10^6 \times 428.205}{3.33 \times 10^{10}}$$

$$= 4.886 \text{ MPa}$$

$$ES = nIf_{cr} = 8.368 \times 4.886 = 40.89 \text{ Mpa}$$

$$f_{si} = -ES = -40.89 \text{ Mpa}$$

$$f_{psi} = f_{pj} - ES$$

$$= \frac{1630000}{990} - 40.89$$

$$= 1605.57 \text{ MPa}$$

$$P_I = f_{psi} A_{ps} + f_{si} A_{ns}$$

$$= 1605.57 \times 990 + (-40.89) \times 1962.5$$

$$= 1509272,275 \text{ N}$$

Jika  $P_I$  di atas dianggap belum memuaskan (asumsi = 1467000 N), harga ini disubstitusikan untuk perhitungan  $f_{cr}$  kembali. Setelah dilakukan beberapa siklus, angka  $P_I$  relatif tidak berubah = 1502714,5 N. Untuk perhitungan selanjutnya digunakan  $P_I = 1500 \text{ kN}$ .

Data penampang tak retak transformasi:

$$A_{ucr} = A_c + (n-1) A_s$$

$$= 400000 + (6,95 - 1)(990 + 1962,5)$$

$$= 417569.135 \text{ mm}^2$$

$$y_{ucr} = \frac{A_c \times y_t + (n-1) A_{ps} \times d_{ps} + (n-1) A_{ns} \times d_{ns}}{A_c + (n-1)(A_{ps} + A_{ns})}$$

$$= \frac{400000 \times 500 + (6,95-1)(990)(885) + (6,95-1)(19625)(950)}{259000 + (6,95-1)(990+1020)}$$

$$= 518017 \text{ mm}$$

$$I_{ucr} = I_c + A_c (y_{ucr} - y_t)^2 + (n-1) A_{ps} (d_{ps} - y_{ucr})^2 + (n-1) A_{ns} (d_{ns} - y_{ucr})^2$$

$$= 3.33 \times 10^{10} + 400000 (518.017 - 500)^2 + 5,95 \times 990 (885 - 518.017)^2 + 5,95 \times 1962.5 (950 - 518.017)^2$$

$$= 3.64 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

### Analisa tegangan karena $P_I$ dan $M_{BS}$

Tegangan beton di lokasi baja pratekan:

$$f_{cpi} = -\frac{P_i}{A_{ucr}} - \frac{P_i \times e_{ucr} \times (d_{ps} - y_{ucr})}{I_{ucr}} + \frac{M_{bs} \times (d_{ps} - y_{ucr})}{I_{ucr}}$$

$$= -\frac{1500 \times 10^3}{417569.135} - \frac{1500 \times 10^3 \times (885 - 518.017)^2}{3.64 \times 10^{10}} + \frac{470 \times 10^6 \times (885 - 518.017)}{3.64 \times 10^{10}}$$

$$= -4.404 \text{ MPa}$$

Tegangan beton di lokasi baja non pratekan

$$f_{csi} = -\frac{P_i}{A_{ucr}} - \frac{P_i \times e_{ucr} \times (d_{ns} - y_{ucr})}{I_{ucr}} + \frac{M_{bs} \times (d_{ns} - y_{ucr})}{I_{ucr}}$$

$$= -\frac{1500 \times 10^3}{417569.135} - \frac{1500 \times 10^3 \times (885 - 518.017)(950 - 518.017)}{3.64 \times 10^{10}} + \frac{470 \times 10^6}{3.64 \times 10^{10}} \times (950 - 518.017)$$

$$= -4.547 \text{ MPa}$$

### Perubahan tegangan pada baja pratekan karena susut dan rangkai

$$\Delta f_{ps} = \frac{n \cdot f_{cpi} \cdot \phi_t + \epsilon_{sh} E_s}{1 + n(\rho_p + \rho_s)(1 + \frac{e^2}{r^2})(1 + 0,8 \phi_t)}$$

$$= \frac{6,95 \times -4.404 \times 1,25 - 225 \times 10^{-6} \times 196500}{1 + 6,95 (\frac{990}{400000} + \frac{1962,5}{400000})(1 + \frac{385^2}{288.675^2})(1 + 0,8 \times 1,25)}$$

$$= -\frac{82.47225}{1,285} = -67.75 \text{ MPa}$$

Koefisien reduksi relaksasi

$$\beta = \frac{f_{psi}}{f_{pu}} = \frac{1500000/990}{1860} = 0.815$$

$$\Omega = \frac{\Delta f_{ps}}{f_{psi}} = \frac{67.751}{(1500000/990)} = 0.045$$

Dari gambar 6. (lampiran),  $\alpha_r = 0.9$

$$\alpha_r \cdot f_{re} = 0.9 \times -333.449 = -300.104 \text{ MPa}$$

Perubahan tegangan yang bergantung waktu pada baja pratekan

$$\Delta f_{ps} = \Delta f_{ps} \text{ susut dan rangkai} + \Delta f_{ps} \text{ relaksasi}$$

$$= -67.751 - \frac{300.104}{1.285} = -314.291 \text{ MPa}$$

Perubahan tegangan pada baja non pratekan karena susut dan rangkai

$$\Delta f_s = \frac{n \cdot f_{csi} \cdot \phi_t + \epsilon_{sh} E_s}{1 + n(\rho_p + \rho_s)(1 + \frac{e^2}{r^2})(1 + 0,8 \phi_t)}$$

$$= \frac{6,95 \times -4.507 \times 1,25 - 225 \times 10^{-6} \times 196500}{1 + 6,95 (\frac{990}{400000} + \frac{1962,5}{400000})(1 + \frac{385^2}{288.675^2})(1 + 0,8 \times 1,25)}$$

$$= -68.777 \text{ MPa}$$

Gaya pratekan efektif dan gaya yang terjadi pada baja non pratekan

$$P_e = P_I - \Delta f_{ps} \times A_{ps}$$

$$= 1500 - 314.291 \times 990 \text{ N} = 1188.852 \text{ kN}$$

$$P_s = \Delta f_s \times A_{ns}$$

$$= -68.777 \times 1962.5 \text{ N} = -134.975 \text{ kN}$$

Momen yang mengakibatkan retak ( $M_{cr}$ )

$$f_r = 0.62 \sqrt{f_c'} = 0.62 \sqrt{35} = 3.66 \text{ MPa}$$

$$M_{cr} = P_e e_{ucr} + \frac{P_e I_{ucr}}{A_{ucr} y_{b-ucr}} + \frac{f_r I_{ucr}}{y_{b-ucr}}$$

$$= 1188852 \times 366.983 + \frac{1188852 \times 3.64 \times 10^{10}}{417569.135 \times 481.983} + \frac{3.66 \times 3.64 \times 10^{10}}{481.983} = 927711714.882 \text{ Nmm}$$

### Analisa tegangan karena $P_e$ dan $M_D$

Tegangan beton di lokasi baja pratekan

$$f_{cpe} = -\frac{P_i}{A_{ucr}} - \frac{P_i x e_{ucr} x (d_{ns} - y_{ucr})}{I_{ucr}} + \frac{M_D x (d_{ps} - y_{ucr})}{I_{ucr}}$$

$$= -\frac{1188.852 \times 10^3}{417569.135} - \frac{1188.852 \times 10^3 \times (885 - 518.017)^2}{3.64 \times 10^{10}} + \frac{470 \times 10^6 \times (885 - 518.017)}{3.64 \times 10^{10}}$$

$$= -0.189 \text{ MPa}$$

Tegangan beton di lokasi baja non pratekan

$$f_{cpe} = -\frac{P_e}{A_{ucr}} - \frac{P_e x e_{ucr} x (d_{ns} - y_{ucr})}{I_{ucr}} + \frac{M_D x (d_{ns} - y_{ucr})}{I_{ucr}}$$

$$= -\frac{1500 \times 10^3}{417569.135} - \frac{1500 \times 10^3 \times (885 - 518.017)(950 - 518.017)}{3.64 \times 10^{10}} + \frac{470 \times 10^6}{3.64 \times 10^{10}} \times (950 - 518.017)$$

$$= 0.282 \text{ MPa}$$

Perubahan gaya pada baja untuk mencapai kondisi dekompresi

$$\Delta P_p = f_{cpe} \times A_{ps} \times n$$

$$= -0.189 \times 990 \times 6,95 \text{ N}$$

$$= -1.297 \text{ kN}$$

$$\Delta P_s = f_{cse} \times A_{ns} \times n$$

$$= 0.282 \times 1962.5 \times 6,95 \text{ N}$$

$$= 3.851 \text{ kN}$$

Gaya dekompresi

$$P_{dc} = P_e + P_s + \Delta P_p + \Delta P_s$$

$$= 1188.852 - 134.975 + 1.297 - 3.851$$

$$= 1051.323 \text{ kN}$$

Parameter-parameter untuk menggunakan tabel dan grafik desain

$$d = \frac{A_{ps} d_{ps} + A_{ns} d_{ns}}{A_{ps} + A_{ns}}$$

$$= \frac{990 \times 885 + 1962.5 \times 950}{990 + 1962.5} = 928.205 \text{ mm}$$

$$n_p = n \frac{(A_{ps} + A_{ns})}{bd}$$

$$= 6,95 \times \frac{(990 + 1962,5)}{400 \times 928.205}$$

$$= 0.055$$

$$p = \frac{P_{dc} d_{ps}}{M_s}$$

$$= \frac{1051.323 \times 885}{1200 \times 10^3} = 0,775$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1$$

Pertambahan tegangan baja setelah dekompresi dan tinggi garis netral

Dengan menggunakan Gambar 7 atau Tabel C akan diperoleh:

$$k = 0,432$$

$$c = kd = 0,432 \times 928.205 = 400.985 \text{ mm}$$

$$f_s / (n\alpha) = 24,53$$

$$f_s = 7.39 \times n \times \frac{M_s}{bd^2}$$

$$f_s = 7.39 \times 6,95 \times \frac{1200 \times 10^6}{400 \times 928.205^2}$$

$$f_s = 178.855 \text{ Mpa}$$

Pertambahan tegangan baja pratekan dan baja non pratekan setelah dekompresi

$$f_{ps} = f_s \frac{d_{ps} - c}{d - c}$$

$$= 178,855 \times \frac{885 - 400.985}{928.205 - 400.985}$$

$$= 164.198 \text{ MPa}$$

$$f_{ns} = f_s \frac{d_{ns} - c}{d - c}$$

$$= 178,855 \times \frac{885 - 400.985}{928.205 - 400.985}$$

$$= 186.248 \text{ MPa}$$

### Perhitungan lebar retak

Rumus Gergely-Lutz

$$w_{max} = k_1 \cdot f_s (d_c A)$$

$$k_1 = 13,7 \times 10^{-6} \text{ (Tabel 2)}$$

$$f_s = f_{ns} = 186.248 \text{ Mpa}$$

$$d_c = 40 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 A &= L \cdot \text{persegi} / \text{jumlah tulangan} \\
 &= 400 \times (1000 - 400.985) / 14 \\
 &= 17114.728 \text{ mm}^2 \\
 W_{\max} &= 13,7 \times 10^{-6} \times 186.248 \times (40 \times 17114.728)^{1/3} \\
 &= 0,225 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Rumus Empiris:

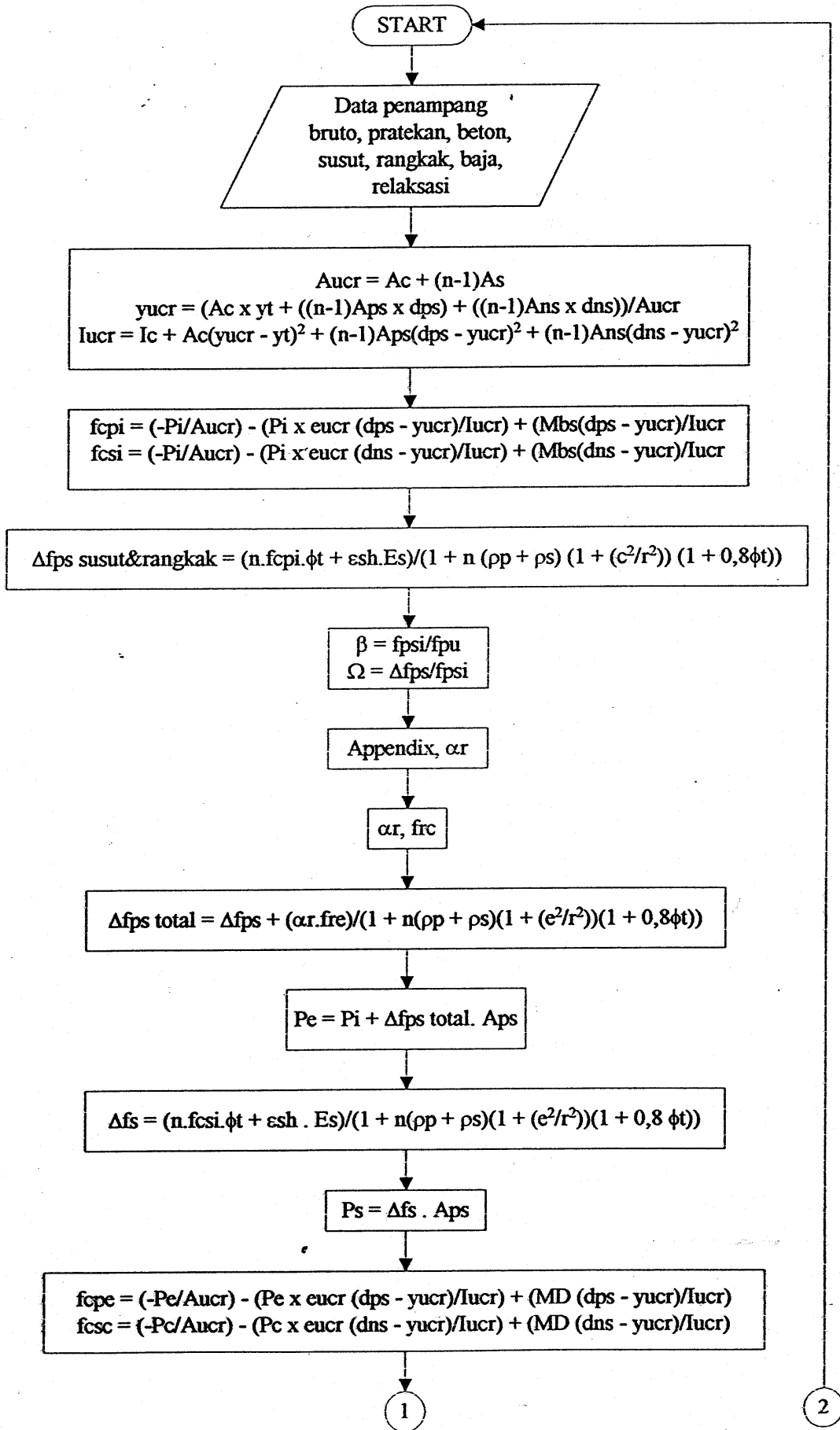
$$\begin{aligned}
 W_{\max} &= k \cdot f_s \cdot d_c \cdot \left( \frac{A_t}{A_s} \right)^{1/2} \\
 k &= 2,55 \times 10^{-6} \text{ (Tabel 1)} \\
 A_t &= L \cdot \text{persegi} \\
 &= 400 \times (1000 - 400.985) \\
 &= 239606,191 \text{ mm}^2 \\
 W_{\max} &= 2,55 \times 10^{-6} \times 1186.248 \times 40 \times \\
 &\quad \left( \frac{239606,191}{990 + 1962,5} \right)^{1/2} \\
 &= 0,171 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

## KESIMPULAN

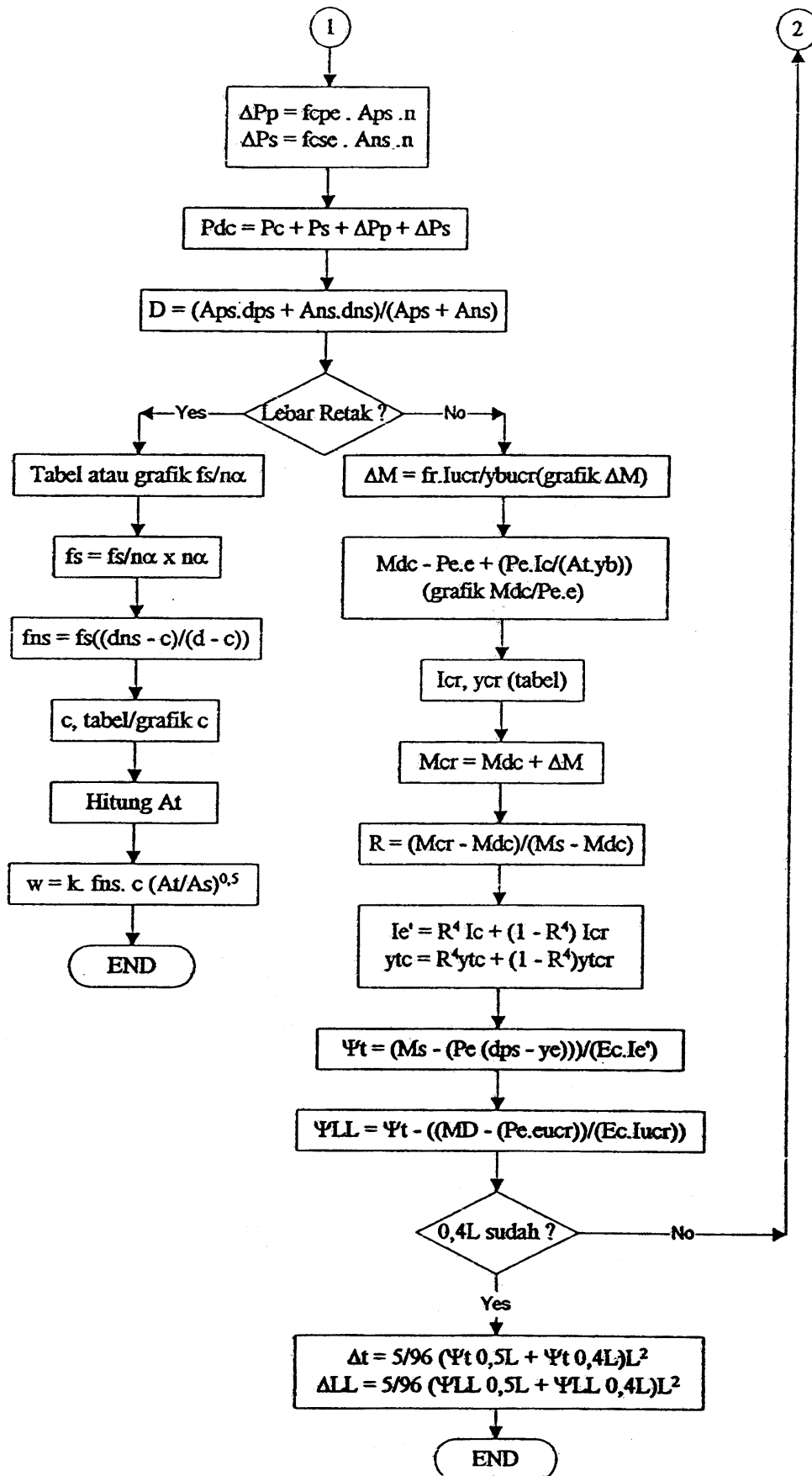
Perhitungan lebar retak dengan menggunakan *unified approach* memudahkan dan menyederhanakan perhitungan, karena digunakan tabel dan grafik yang sama untuk mendesain tulangan dan tegangan yang terjadi baik pada beton pratekan, beton pratekan parsial maupun beton bertulang biasa.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Mast, Robert F., Unified Design Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Flexural and Compression Members. ACI Structural Journal, Vol 89, No. 2, March-April 1992, pp.
2. Jepira, Harry J. dan Saputro H., Tabel dan Grafik Perhitungan Beton Bertulang dengan "Unified Design Provision" (SCI 318-95), Skripsi No. Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, Surabaya, 1997.
3. Dilger, H. & KM. Suri, Crack Width of Partially Prestressed Concrete Members. ACI Structural Journal Vol. 83 No. 5 September-Oktober 1986. pp 784-797
4. Dilger, H. & KM. Suri. Steel Stresses in Partially Prestressed Concrete Members. PCI Journal Vol. 31 No. 3 May-June 1986. pp 88-112.
5. Meier, Stephen W., and Gergely, Peter, Flexural Crack Width in Prestressed Concrete Beams, Proceedings, ASCE, Vol. 107, No. ST2 February 1981, pp. 429-433.
6. Martino, NE. and Nilson A.H., Crack Width in Partially Prestressed Beams, Report No. 6504, Institut fur Bausantik ETH, Zurich, 1970-1971, V-1.3 (in German).
7. Bennet, E.W., and Chandrasekhar, C.S., Calculation of the Width of Crack in 'Class 3' Prestressed Beams, Proceedings. Institution of Civil Engineers (London), Vol. V, No. 49, July 1971, pp. 333-346.
8. Scholz, H. Simple Deflection and Cracking Rules for Partially Prestressed Members, ACI Structural Journal Vol. 88 No. 2 March-April 1991, pp 199-203
9. Tadros, Maher K. Expedient Service Load Analysis of Cracked Prestressed Concrete Sections. PCI Journal Vol. 27 No. 6 November-December 1982. Pp. 86-111.







Gambar 5. Diagram alir perhitungan lebar retak dan defleksi pada beton pratekan parsial

Tabel A. Tegangan Baja setelah Dekompresi

$$f_s = \frac{\text{koefisien}}{100} \times n \times \alpha$$

$n\rho = (E_{ps}A_{ps} + E_m A_m)/(E_c b d)$        $\alpha = M_u/bd^2$   
 $\rho = P_u d_p/M_u$ ,  $\alpha_1 = b_w/b$ ,  $\alpha_2 = h_f/d$

p	$\alpha_1$		0,30					0,40					0,50					1,00
	$n\rho$	$\alpha_2$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	1,00
0,6	0,005		8824	8917	8987	8772	7318	8870	8930	8987	8797	7457	8903	8942	8988	8824	7614	8991
	0,010		4597	4578	4653	4682	4394	4627	4600	4658	4683	4425	4646	4619	4663	4683	4458	4684
	0,015		3165	3116	3161	3206	3144	3186	3139	3171	3208	3153	3198	3157	3180	3209	3162	3215
	0,020		2437	2379	2405	2446	2451	2453	2401	2417	2449	2453	2462	2418	2428	2453	2456	2468
	0,025		1993	1934	1948	1981	2011	2006	1954	1961	1987	2011	2013	1970	1973	1992	2011	2013
	0,030		1693	1635	1641	1669	1706	1704	1654	1655	1675	1706	1709	1668	1667	1682	1706	1706
	0,035		1476	1420	1421	1443	1483	1486	1438	1435	1451	1483	1490	1451	1446	1458	1483	1484
	0,040		1312	1257	1255	1273	1312	1320	1274	1269	1282	1313	1323	1286	1280	1289	1313	1316
	0,045		1182	1130	1125	1140	1177	1190	1146	1139	1149	1178	1192	1157	1150	1157	1179	1184
	0,050		1077	1027	1021	1033	1068	1084	1042	1034	1042	1070	1086	1053	1045	1050	1071	1078
	0,055		991	942	935	946	978	997	957	948	955	980	999	967	959	962	982	990
	0,060		918	872	863	872	902	924	885	876	881	905	925	895	886	889	907	916
	0,065		855	811	802	810	838	861	825	815	819	841	863	834	825	827	843	854
	0,070		802	759	750	756	782	807	772	762	765	785	808	781	771	773	788	799
	0,075		755	714	704	709	734	760	726	716	718	737	761	734	725	726	740	752
0,080		713	674	664	668	691	718	686	675	677	694	719	694	685	685	698	710	
0,085		676	638	628	632	653	681	650	640	641	657	682	658	648	648	660	673	
0,090		643	606	596	599	619	648	618	608	608	623	649	625	616	616	627	640	
0,095		614	578	568	570	589	618	589	579	579	593	619	596	587	586	596	611	
0,100		587	552	542	544	562	591	563	553	553	566	592	570	561	560	569	584	
0,150		411	385	376	375	386	415	393	385	383	390	416	399	391	389	394	409	
0,7	0,005		6940	6994	7109	7018	5985	6991	7017	7110	7029	6083	7027	7037	7110	7042	6194	7113
	0,010		3682	3632	3704	3759	3598	3713	3661	3714	3759	3616	3731	3685	3723	3760	3636	3762
	0,015		2565	2495	2531	2583	2578	2586	2522	2546	2587	2582	2598	2544	2559	2591	2586	2607
	0,020		1992	1919	1936	1977	2013	2008	1944	1952	1984	2013	2016	1963	1967	1990	2014	2016
	0,025		1640	1569	1575	1607	1654	1653	1592	1592	1616	1654	1659	1609	1606	1623	1654	1654
	0,030		1401	1333	1333	1357	1405	1412	1354	1349	1367	1406	1416	1370	1363	1376	1406	1408
	0,035		1227	1162	1158	1177	1223	1236	1182	1174	1188	1224	1239	1196	1188	1197	1225	1230
	0,040		1094	1033	1026	1041	1084	1102	1052	1042	1052	1086	1105	1065	1055	1061	1087	1095
	0,045		989	931	922	935	974	996	949	938	945	976	999	961	950	955	978	988
	0,050		904	849	839	849	885	911	866	854	860	888	913	877	866	869	890	902
	0,055		833	781	770	778	811	840	797	785	789	814	841	808	797	798	817	831
	0,060		773	724	712	719	749	780	739	727	730	753	781	749	738	739	756	770
	0,065		722	675	663	668	696	728	689	677	679	700	730	699	688	688	704	719
	0,070		678	633	621	625	651	684	647	634	636	655	685	656	645	645	659	675
	0,075		639	596	584	587	611	645	609	597	598	615	646	618	607	607	619	636
0,080		605	563	551	554	576	610	576	564	564	580	611	585	574	573	585	602	
0,085		574	534	522	524	545	580	547	535	535	550	581	555	545	543	554	571	
0,090		547	508	497	498	517	552	521	509	508	522	553	529	518	517	526	544	
0,095		522	485	473	474	492	527	497	485	484	497	528	505	495	493	502	519	
0,100		500	464	452	453	470	505	475	464	463	475	506	483	473	471	479	497	
0,150		353	326	316	315	324	357	335	326	323	330	358	341	333	330	334	352	
0,8	0,005		5121	5109	5251	5273	4656	5175	5146	5257	5275	4715	5212	5178	5263	5277	4780	5288
	0,010		2803	2715	2773	2846	2806	2834	2752	2791	2850	2814	2851	2782	2808	2853	2822	2869
	0,015		1989	1895	1917	1970	2017	2010	1928	1938	1979	2017	2020	1953	1957	1987	2018	2020
	0,020		1565	1475	1480	1518	1579	1580	1504	1502	1529	1579	1587	1526	1520	1540	1579	1580
	0,025		1301	1218	1213	1241	1301	1314	1244	1235	1254	1302	1318	1262	1252	1265	1303	1308
	0,030		1119	1042	1033	1053	1108	1130	1066	1054	1067	1110	1134	1083	1071	1079	1112	1121
	0,035		986	915	903	918	967	996	936	923	932	970	998	952	938	944	973	985
	0,040		884	817	804	815	859	892	837	823	829	863	895	851	838	841	866	881
	0,045		802	740	726	734	773	810	759	744	748	778	812	772	758	760	782	799
	0,050		736	677	662	669	704	743	695	680	682	709	745	707	694	694	714	732
	0,055		681	625	610	615	647	687	642	627	628	652	689	654	640	640	657	676
	0,060		634	581	566	570	598	640	597	582	583	604	642	608	595	594	609	629
	0,065		593	543	528	531	557	600	559	544	544	563	601	569	556	555	568	589
	0,070		558	511	496	497	521	564	526	511	510	527	566	535	523	521	533	554
	0,075		527	482	467	468	490	533	496	482	481	496	535	506	493	491	502	524
0,080		500	456	442	443	463	506	470	457	455	469	507	479	467	465	475	496	
0,085		475	434	420	420	438	481	447	434	432	445	482	456	444	442	450	472	
0,090		453	413	400	399	417	459	426	413	411	423	460	435	424	421	429	451	
0,095		434	395	381	381	397	439	408	395	392	403	440	416	405	402	409	431	
0,100		415	378	365	364	379	421	391	378	375	386	422	399	388	385	391	413	
0,150		296	268	257	255	264	301	278	268	265	270	302	285	276	273	276	296	

**Tabel B. Balok Persegi dengan Tulangan Tunggal**  
 Rasio tulangan ( $\rho$ )  
 $M_U$  (kNm),  $b$  dan  $d$  (m),  $f_y$  (MPa),  $f_c'$  (MPa)

$\beta_1=0.81$   
 $f_c' = 35 \text{ Mpa}$      $f_y = 400 \text{ Mpa}$

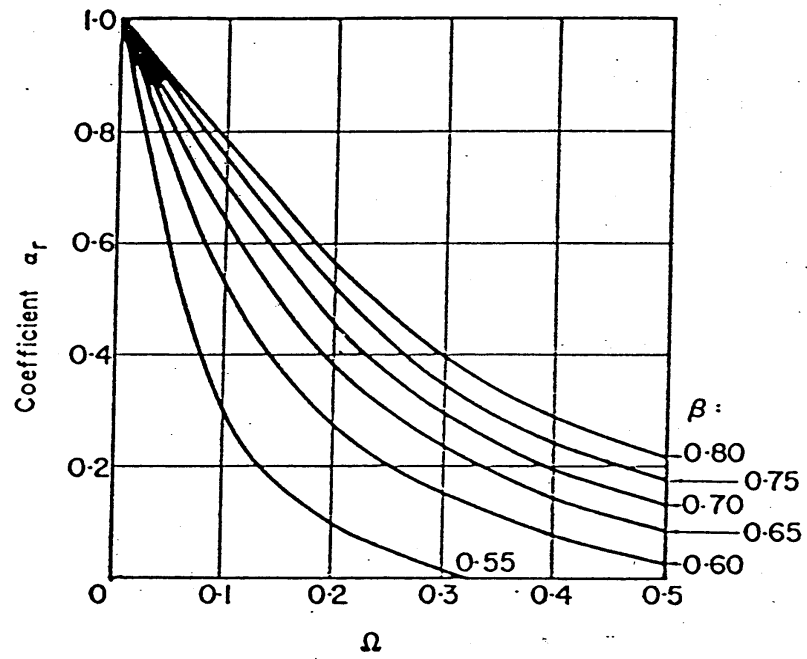
$M_u/bd^2$	$\epsilon$	$c/dt$	$\phi$	$z/d$	$\rho$	Strand/fps= (Mpa)		
						1720	1760	1860
100	0.5741	0.005	0.80	0.998	0.0003	0.9938	0.9933	0.9931
200	0.2849	0.010	0.80	0.996	0.0006	0.9934	0.9929	0.9926
300	0.1886	0.016	0.80	0.994	0.0009	0.9929	0.9924	0.9921
400	0.1404	0.021	0.80	0.992	0.0013	0.9925	0.9920	0.9916
500	0.1114	0.026	0.80	0.989	0.0016	0.9921	0.9915	0.9910
600	0.0922	0.032	0.80	0.987	0.0019	0.9916	0.9911	0.9905
700	0.0784	0.037	0.80	0.985	0.0022	0.9912	0.9906	0.9900
800	0.0681	0.042	0.80	0.983	0.0025	0.9907	0.9901	0.9894
900	0.0600	0.048	0.80	0.981	0.0029	0.9903	0.9896	0.9888
1000	0.0536	0.053	0.80	0.979	0.0032	0.9898	0.9891	0.9883
1100	0.0483	0.058	0.80	0.976	0.0035	0.9893	0.9886	0.9877
1200	0.0439	0.064	0.80	0.974	0.0038	0.9888	0.9880	0.9871
1300	0.0402	0.069	0.80	0.972	0.0042	0.9883	0.9875	0.9865
1400	0.0371	0.075	0.80	0.970	0.0045	0.9878	0.9870	0.9859
1500	0.0343	0.080	0.80	0.967	0.0048	0.9872	0.9864	0.9852
1600	0.0319	0.086	0.80	0.965	0.0052	0.9867	0.9858	0.9846
1800	0.0279	0.097	0.80	0.961	0.0059	0.9856	0.9846	0.9832
2000	0.0246	0.109	0.80	0.956	0.0065	0.9844	0.9834	0.9818
2200	0.0220	0.120	0.80	0.951	0.0072	0.9832	0.9821	0.9804
2400	0.0198	0.131	0.80	0.947	0.0079	0.9819	0.9806	0.9788
2600	0.0180	0.143	0.80	0.942	0.0086	0.9806	0.9794	0.9772
2800	0.0164	0.155	0.80	0.937	0.0093	0.9792	0.9779	0.9755
3000	0.0150	0.167	0.80	0.932	0.0101	0.9777	0.9763	0.9738
3200	0.0138	0.179	0.80	0.928	0.0108	0.9762	0.9747	0.9719
3400	0.0127	0.191	0.80	0.923	0.0115	0.9746	0.9730	0.9699
3600	0.0117	0.204	0.80	0.918	0.0123	0.9729	0.9711	0.9679
3800	0.0109	0.216	0.80	0.913	0.0130	0.9710	0.9692	0.9657
4000	0.0101	0.229	0.80	0.907	0.0138	0.9691	0.9672	0.9633
4200	0.0094	0.241	0.80	0.902	0.0145	0.9671	0.9650	0.9609
4400	0.0088	0.254	0.80	0.897	0.0153	0.9649	0.9627	0.9582
4600	0.0082	0.268	0.80	0.892	0.0161	0.9626	0.9603	0.9554
4800	0.0077	0.281	0.80	0.886	0.0169	0.9602	0.9577	0.9524
5000	0.0072	0.294	0.80	0.881	0.0177	0.9575	0.9549	0.9492
5200	0.0067	0.308	0.80	0.875	0.0186	0.9547	0.9519	0.9457
5400	0.0063	0.322	0.80	0.870	0.0194	0.9517	0.9486	0.9420
5600	0.0059	0.336	0.80	0.864	0.0203	0.9484	0.9451	0.9380
5800	0.0056	0.351	0.80	0.858	0.0211	0.9449	0.9414	0.9336
6000	0.0052	0.365	0.80	0.852	0.0220	0.9410	0.9372	0.9288
6131	0.0050	0.375	0.80	0.848	0.0226	0.9383	0.9343	0.9254
6200	0.0047	0.388	0.786	0.843	0.0234	0.9344	0.9301	0.9206
6300	0.0044	0.408	0.768	0.835	0.0246	0.9280	0.9233	0.9126

Tabel C. Tinggi Netral Penampang Retak Transformasi

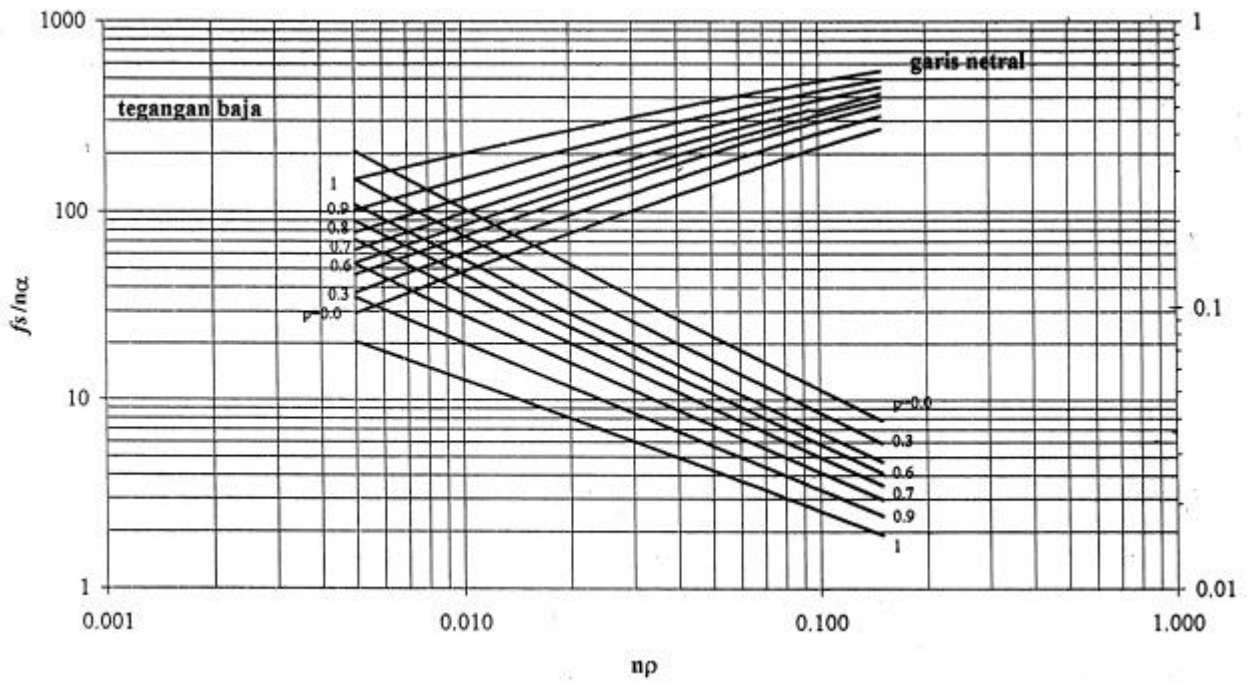
$$c = \frac{\text{koefisien}}{1000} \times d$$

$n_p = (E_{ps}A_{ps} + E_{st}A_{st}) / (E_c b d)$   
 $p = P_d c d_w / M_r, \alpha_1 = b_w / b, \alpha_2 = h_f / d$

p	$\alpha_1$	0,30					0,40					0,50					1,00
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	1,00
0,6	0,005	174	147	142	148	179	167	146	142	148	176	161	145	142	147	172	142
	0,010	250	213	196	192	208	237	209	195	192	206	226	205	195	192	205	192
	0,015	304	263	239	229	235	286	256	237	229	234	272	249	235	229	233	228
	0,020	346	303	276	262	259	324	293	272	261	259	308	285	269	260	258	257
	0,025	380	337	308	290	281	356	325	302	289	281	338	315	298	287	281	281
	0,030	410	366	335	316	302	384	352	329	313	302	363	340	323	311	302	302
	0,035	435	392	360	339	321	407	376	352	335	321	386	363	345	332	321	320
	0,040	457	415	382	360	338	429	398	373	356	338	406	383	365	352	338	337
	0,045	477	435	403	379	355	448	417	392	374	354	424	402	384	370	354	352
	0,050	496	454	421	397	370	465	435	410	391	370	440	418	400	386	369	366
	0,055	512	471	438	413	385	480	451	426	407	384	456	434	416	401	383	379
	0,060	527	487	454	429	399	495	466	441	421	397	470	448	430	415	396	391
	0,065	541	501	469	443	412	508	479	455	435	410	482	461	443	428	409	402
	0,070	554	515	482	457	424	521	492	468	448	422	495	474	456	441	420	413
	0,075	566	528	495	469	436	533	504	480	460	434	506	485	467	452	431	423
0,080	577	539	507	481	447	544	516	492	472	444	517	496	478	463	442	432	
0,085	588	550	519	493	457	554	526	502	482	455	527	507	489	474	452	441	
0,090	598	561	529	503	468	564	536	513	493	464	536	516	499	484	462	450	
0,095	607	571	539	513	477	573	546	522	503	474	545	526	508	493	471	458	
0,100	616	580	549	523	487	582	555	532	512	483	554	534	517	502	480	466	
0,150	685	653	625	600	562	650	626	605	586	556	621	604	588	574	551	529	
0,7	0,005	199	168	158	162	189	190	166	158	161	186	182	164	158	161	183	158
	0,010	281	242	220	213	223	265	236	219	213	222	252	231	218	212	221	212
	0,015	337	296	269	255	254	316	286	265	254	253	300	278	262	253	253	250
	0,020	381	338	309	290	281	356	326	303	289	281	337	315	298	287	281	281
	0,025	415	374	342	322	306	389	359	335	319	306	368	346	329	316	306	306
	0,030	445	404	372	349	328	417	387	363	345	328	394	373	355	341	328	327
	0,035	470	430	397	373	349	440	411	387	368	349	417	396	378	364	348	347
	0,040	493	453	420	395	368	462	433	409	389	367	437	417	399	384	367	364
	0,045	512	473	441	416	386	481	452	428	409	385	456	435	417	402	384	379
	0,050	530	492	460	434	402	498	470	446	426	401	472	452	434	419	399	393
	0,055	546	509	477	451	417	513	486	462	442	416	487	467	450	435	414	407
	0,060	561	525	493	467	432	528	501	477	457	430	501	482	464	449	428	419
	0,065	575	539	507	481	445	541	515	491	471	443	514	495	477	462	440	430
	0,070	588	552	521	495	458	553	527	504	484	455	526	507	490	475	452	441
	0,075	599	565	534	507	470	565	539	516	496	467	537	518	501	486	464	451
0,080	610	576	546	519	482	575	550	528	508	478	548	529	512	497	474	460	
0,085	620	587	557	531	493	585	561	538	518	488	557	539	523	508	485	469	
0,090	630	597	567	541	503	595	571	548	529	498	567	549	533	518	494	478	
0,095	639	607	577	551	513	604	580	558	538	508	576	558	542	527	504	486	
0,100	647	616	587	561	522	612	589	567	548	517	584	567	551	536	512	494	
0,150	712	685	659	636	597	678	657	638	620	590	650	634	620	606	583	556	
0,8	0,005	236	200	184	182	204	223	196	184	182	202	213	193	183	182	200	182
	0,010	323	283	256	243	245	303	274	253	242	245	287	266	250	242	244	240
	0,015	381	341	310	291	281	356	327	304	289	281	337	316	299	287	281	280
	0,020	424	385	353	331	312	397	368	345	327	312	375	355	337	324	312	312
	0,025	459	421	389	364	340	429	402	378	359	339	407	387	369	355	339	338
	0,030	488	451	419	393	364	457	430	406	387	364	433	414	396	381	363	360
	0,035	513	477	445	419	387	481	455	431	411	386	456	437	419	404	385	380
	0,040	535	500	468	442	407	502	476	453	433	406	476	457	440	425	404	397
	0,045	554	520	489	462	426	520	496	473	452	424	494	476	459	444	422	413
	0,050	571	538	508	481	443	537	513	490	470	441	510	493	476	461	438	427
	0,055	587	555	525	498	459	552	529	506	486	456	525	508	491	476	453	440
	0,060	601	570	540	514	474	566	543	521	501	470	538	522	505	491	467	453
	0,065	614	583	554	528	488	579	556	535	515	484	551	535	519	504	480	464
	0,070	626	596	568	542	501	591	569	548	528	496	562	547	531	516	492	475
	0,075	637	608	580	554	513	602	580	559	540	508	573	558	542	528	503	485
0,080	647	619	591	566	525	612	591	570	551	519	583	568	553	538	514	494	
0,085	657	629	602	577	536	621	601	581	562	530	593	578	563	549	524	503	
0,090	666	639	612	587	546	630	610	590	572	540	602	587	572	558	534	511	
0,095	675	648	622	597	556	639	619	600	581	549	610	596	581	567	543	519	
0,100	683	656	630	606	565	647	628	608	590	558	618	604	590	576	552	527	
0,150	743	721	699	677	639	709	693	676	659	629	681	669	656	644	621	588	



Gambar 6. Koefisien Reduksi Relaksasi



Gambar 7. Hubungan  $f_s$  dan  $k$  untuk  $a_1=a_2=1$