

SOLUSI EKSAK BALOK BETON BERTULANGAN RANGKAP DENGAN RASIO TULANGAN DESAK TERHADAP TULANGAN TARIK TERTENTU

Yoyong Arfiadi

*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44 Yogyakarta 55281
Email: yoyong@mail.uajy.ac.id atau yoyong_arfiadi@ymail.com*

ABSTRAK

Dalam perencanaan balok beton bertulang selain tulangan yang dipasang di daerah tarik umumnya dipasang pula tulangan di daerah desak. Hal ini selain untuk menambah daktilitas, tulangan rangkap juga digunakan untuk memenuhi persyaratan perencanaan struktur tahan gempa di mana suatu tampang balok harus paling tidak mempunyai rasio kapasitas tertentu terhadap kapasitas maksimum dalam mendukung beban. Dengan anggapan rasio kapasitas-dukung beban sebanding dengan jumlah tulangan terpasang, maka rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik dapat ditentukan terlebih dahulu oleh perencana. Sampai saat ini belum ada persamaan yang tersedia dalam *literature* untuk penyelesaian eksak pada kasus tersebut. Hal ini dikarenakan jika tulangan desak diperhitungkan dalam perencanaan, persamaan untuk mendapatkan tulangan tarik dan desak tidak dapat langsung diperoleh. Dalam tulisan ini diuraikan penyelesaian eksak untuk memperoleh luas tulangan dengan rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik yang telah ditentukan oleh perencana. Berdasarkan keseimbangan gaya dan momen yang terjadi dapat diperoleh persamaan untuk tinggi blok desak beton ekuivalen. Jika tulangan baja desak sudah luluh, persamaan untuk tinggi blok desak beton ekuivalen merupakan persamaan pangkat dua; sedangkan jika tulangan baja desak belum luluh, persamaan untuk tinggi blok desak beton ekuivalen merupakan persamaan pangkat tiga. Pada bagian akhir disajikan contoh aplikasi dari persamaan yang telah diturunkan.

Kata kunci: balok beton bertulangan rangkap, tulangan desak, solusi eksak, rasio tulangan desak

1. PENDAHULUAN

Untuk balok beton bertulang pada bangunan di daerah gempa, umumnya dipasang tulangan rangkap. Hal ini mengingat beban gempa merupakan pembebanan bolak-balik sehingga memungkinkan serat atas dan bawah balok menjadi serat desak atau serat tarik. Dalam perencanaan balok beton bertulang yang mengalami lenturan, luas tulangan biasanya ditentukan dari besarnya momen yang terjadi. Umumnya perencana akan merencanakan balok sebagai balok tulangan tunggal terlebih dulu. Jika momen akibat beban luar cukup besar, baru tulangan desak ditambahkan untuk mendukung sisa momen yang bekerja. Dengan cara perancangan ini maka rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik sangat bervariasi, tergantung dari besarnya momen yang bekerja. Selain itu ada kemungkinan bahwa tulangan yang terpasang tidak memenuhi persyaratan ketahanan gempa.

Menurut peraturan beton Indonesia SNI 03-2847-2002, untuk elemen struktur yang direncanakan sebagai elemen SRPMM (Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah) atau SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus) terdapat syarat tertentu sehingga tulangan atas dan tulangan bawah selalu terpasang pada seluruh bentangan balok. Pada balok SRPMK sesuai dengan pasal 23.3.2.(1), pada suatu balok sekurang-kurangnya harus ada dua batang tulangan atas dan dua batang tulangan bawah yang dipasang secara menerus. Selain itu menurut pasal 23.3.2.(1), kuat lentur momen positif komponen lentur pada muka kolom tidak boleh kurang dari setengah kuat lentur negatifnya. Baik kuat lentur negatif maupun kuat lentur positif pada setiap penampang di sepanjang bentangan balok tidak boleh kurang dari seperempat kuat lentur terbesar pada kedua muka kolom. Untuk elemen struktur SRPMM, menurut pasal 23.10.4.(1), kuat lentur positif komponen struktur lentur pada muka kolom tidak boleh lebih kecil dari sepertiga kuat lentur negatifnya pada muka tersebut. Baik kuat lentur negatif maupun kuat lentur positif pada setiap penampang di sepanjang bentangan balok tidak boleh kurang dari seperlima kuat lentur terbesar pada muka kolom di kedua ujung komponen tersebut. Dengan anggapan bahwa perbandingan kuat momen negatif dan positif sebanding dengan rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik, maka persamaan-persamaan perlu diturunkan agar perencanaan dapat dengan mudah dilakukan. Untuk komponen struktur SRPMK misalnya maka rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik dapat diambil sebesar setengahnya, yang merepresentasikan kuat momen negatif lebih kurang setengah kuat momen positifnya.

2. BALOK BETON BERTULANGAN RANGKAP

Ditinjau suatu balok beton bertulang bertulangan rangkap seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Dengan mengabaikan luas beton yang ditempati tulangan desak, maka blok desak beton menjadi:

$$C_c = 0.85 f'_c a b \quad (1a)$$

Dengan f'_c = kuat desak beton pada umur 28 hari, a = tinggi blok desak beton ekuivalen dan b = lebar tampang balok.

Gaya pada baja desak dihitung dengan:

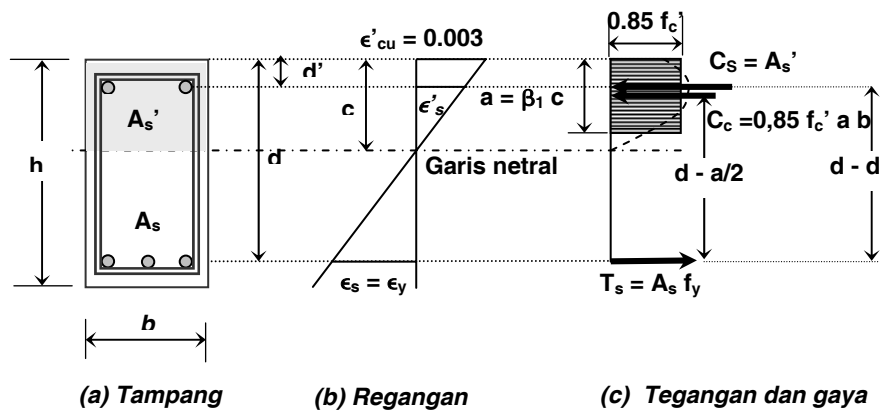
$$C_s = A'_s f'_s \quad (1b)$$

A'_s = luas tulangan baja desak dan f'_s = tegangan pada baja desak.

Gaya tarik pada baja tarik dapat dihitung dengan:

$$T_s = A_s f_y \quad (1c)$$

dengan A_s = luas tulangan baja tarik dan f_y = tegangan luluh baja.



Gambar 1. Balok bertulangan rangkap

Tinggi blok desak beton ekuivalen dapat dinyatakan dengan

$$a = \beta_1 c \quad (2)$$

dengan c = tinggi garis netral, dan β_1 = koefisien tinggi blok desak beton ekuivalen.

Tulangan pada baja desak dapat luluh atau tidak luluh menurut persamaan

$$f'_s = f_y \quad \text{jika } \epsilon'_s \geq \epsilon_y \quad (3a)$$

dan

$$f'_s = E_s \epsilon'_s \quad \text{jika } \epsilon'_s < \epsilon_y \quad (3b)$$

dengan E_s = modulus elastik baja yang dapat diambil = 200000MPa, ϵ'_s = regangan pada baja desak dan ϵ_y = regangan luluh baja tulangan.

Regangan pada baja desak dapat dihitung dengan persamaan:

$$\varepsilon'_s = \left(\frac{c - d'}{c} \right) \varepsilon'_{cu} \quad (4)$$

Untuk $\varepsilon'_s < \varepsilon_y$ tegangan pada baja desak dapat dihitung dengan:

$$f'_s = E_s \left(\frac{c - d'}{c} \right) \varepsilon'_{cu}$$

dengan $d' =$ jarak dari serat desak ke titik berat tulangan desak. Dengan mensubstitusikan $E_s = 200000$ MPa dan $\varepsilon'_{cu} = 0,003$ selanjutnya dapat diperoleh

$$f'_s = 600 \left(1 - \frac{d'}{c} \right) \quad (5a)$$

atau

$$f'_s = 600 \left(1 - \beta_1 \frac{d'}{a} \right) \quad (5b)$$

Keseimbangan gaya-gaya dapat dinyatakan dengan

$$C_c + C_s = T_s \quad (6)$$

dan dengan memperhatikan persamaan (1a-c) serta beberapa manipulasi dapat diperoleh

$$\rho = 0,85\alpha \frac{f'_c}{f_y} \frac{1}{\left(1 - \delta \frac{f'_s}{f_y} \right)} \quad (7)$$

dengan

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{a}{d} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{A'_s}{A_s} \quad (10)$$

Momen nominal terhadap tulangan tarik menghasilkan:

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (11)$$

Substitusikan persamaan (1), (5), (7) dan (10) pada persamaan (11) menghasilkan:

$$R_n = \rho \left\{ f_y \left(1 - \delta \frac{f'_s}{f_y} \right) \left(1 - 0,5 \frac{a}{d} \right) + \delta f'_s \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \right\} \quad (12)$$

dengan

$$R_n = \frac{M_n}{bd^2} \quad (13a)$$

dan

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \quad (13b)$$

dengan ϕ = faktor reduksi kekuatan untuk lenturan.

Kasus 1: tulangan desak sudah luluh

Jika tulangan desak sudah luluh, maka $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$ sehingga $f_s' = f_y$. Dengan mensubstitusikan persamaan (7) pada persamaan (12) dengan $f_s' = f_y$ dan dengan beberapa manipulasi diperoleh suatu persamaan kuadrat sebagai berikut:

$$0.425f_c'\alpha^2 - 0.85f_c'\left[1 + \frac{\delta}{1-\delta}(1-\gamma)\right]\alpha + R_n = 0 \quad (14)$$

dengan

$$\gamma = \frac{d'}{d} \quad (15)$$

Persamaan (14) dapat digunakan untuk menghitung nilai α jika momen akibat beban luar, ukuran tampang, mutu beton, mutu baja serta rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik diketahui. Selanjutnya tegangan pada baja desak dapat diperiksa dengan persamaan (5). Jika tulangan desak luluh maka anggapan benar sehingga rasio tulangan dapat dihitung dengan persamaan (7). Dengan persamaan (8) dan (10) luas tulangan tarik dan desak dapat diperoleh.

Kasus 2: tulangan desak belum luluh

Sering dijumpai bahwa tulangan desak belum luluh terutama untuk rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik δ yang besar. Dengan mensubstitusikan persamaan (7) pada persamaan (12) dan dengan menggunakan persamaan (5b) diperoleh:

$$A_1\alpha^3 + A_2\alpha^2 + A_3\alpha + A_4 = 0 \quad (16)$$

dengan

$$A_1 = 0.425f_c'(f_y - 600\delta) \quad (17a)$$

$$A_2 = 0.85f_c'(300\delta\beta_1\gamma + 600\delta\gamma - f_y) \quad (17b)$$

$$A_3 = R_n(f_y - 600\delta) - 510f_c'\delta\beta_1\gamma^2 \quad (17c)$$

$$A_4 = 600\delta\beta_1\gamma R_n \quad (17d)$$

Dengan menggunakan persamaan (16) tinggi blok desak beton dapat diketahui, yang selanjutnya dapat digunakan untuk memeriksa tegangan baja desak. Jika baja desak belum luluh berarti anggapan benar. Rasio tulangan selanjutnya dapat dihitung dengan persamaan (7). Persamaan (8) dan (10) digunakan untuk menghitung luas tulangan tarik dan desak yang diperlukan.

3. PENYELESAIAN PERSAMAAN

Tergantung dari kondisi tegangan baja desak, tinggi blok desak beton dapat dihitung dari persamaan (14) atau (16). Untuk kondisi persamaan (14) rasio tinggi blok desak beton terhadap tinggi efektif α dapat dihitung dengan mudah karena merupakan persamaan kuadrat. Untuk kondisi di mana baja desak belum luluh sesuai persamaan (16), maka penyelesaian dapat dilakukan sebagai berikut ini (Karasudhi, 1992).

Ubah persamaan (16) menjadi persamaan:

$$\alpha^3 - I_1\alpha^2 + I_2\alpha - I_3 = 0 \quad (18)$$

dengan

$$I_1 = -\frac{A_2}{A_1}, \quad I_2 = \frac{A_3}{A_1}, \quad I_3 = -\frac{A_4}{A_1} \quad (19a-c)$$

Penyelesaian persamaan (18) dapat dilakukan sebagai berikut (Karasudhi, 1992):

$$a_o = \frac{(I_1^2 - 3I_2)}{3} \quad (20a)$$

$$b_o = \frac{(2I_1^3 - 9I_1I_2 + 27I_3)}{27} \quad (20b)$$

Selanjutnya

(a) Jika $27b_o^2 - 4a_o^3 = 0$:

persamaan (18) mempunyai 3 akar; dengan paling sedikit 2 akar kembar:

$$\alpha_1 = (4b_o)^{1/3} + \frac{I_1}{3} \quad (21a)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = -\left(\frac{b}{2}\right)^{1/3} + \frac{I_1}{3} \quad (21b)$$

(b) Jika $27b_o^2 - 4a_o^3 < 0$:

$$\alpha_1 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \quad (22a)$$

$$\alpha_2 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{2\pi + \phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \quad (22b)$$

$$\alpha_3 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{4\pi + \phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \quad (22c)$$

dengan

$$\cos \phi = \frac{3\sqrt{3}(b_o)}{2a_o^{3/2}} \quad (22d)$$

4. CONTOH PENGGUNAAN

Contoh 1: Tulangan desak belum luluh

Ditinjau suatu balok beton bertulang dengan $b = 300$ mm, $h = 500$ mm, $f_c' = 20$ MPa, $f_y = 400$ MPa dan $M_u = 180$ kNm. Hitung tulangan yang diperlukan jika akan digunakan rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik $\delta = 0,5$.

Penyelesaian:

Misal digunakan tulangan D22 dengan sengkang diameter 10 mm. Dianggap hanya diperlukan satu lapis tulangan, sehingga jarak dari tepi desak ke titik berat tulangan desak = $d' = 40 + 10 + 0,5 \times 22 = 61$ mm. Demikian pula jarak dari tepi tarik ke titik berat tulangan tarik = 61 mm.

Tinggi efektif: $d = 500 - 61 = 439$ mm; $\gamma = \frac{d'}{d} = 0,139$

Tahanan momen: $R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \frac{180 \times 10^6}{0,8 \times 300 \times 439^2} = 3,8916$ MPa, dengan faktor reduksi kekuatan $\phi = 0,8$.

Mengingat momen yang harus didukung relatif tidak begitu besar dan dengan nilai δ yang cukup besar tulangan desak dianggap belum luluh, sehingga berlaku persamaan (16): $A_1\alpha^3 + A_2\alpha^2 + A_3\alpha + A_4 = 0$.

Dari persamaan (17a) – (17d) diperoleh berturut-turut:

$$A_1 = 0.425f_c'(f_y - 600\delta) = 0,425 \times 20 \times (400 - 600 \times 0,5) = 850;$$

$$A_2 = 0.85f_c'(300\delta\beta_1\gamma + 600\delta\gamma - f_y) = 0,85 \times 20 \times (300 \times 0,5 \times 0,139 + 600 \times 0,5 \times 0,139 - 400) = -5790,1651;$$

$$A_3 = R_n(f_y - 600\delta) - 510f_c'\delta\beta_1\gamma^2 = 3,8916 \times (400 - 600 \times 0,5) = 305,4647$$

$$A_4 = 600\delta\beta_1\gamma R_n = 600 \times 0,5 \times 0,85 \times 0,139 \times 3,8916 = 137,8916.$$

Selanjutnya untuk memperoleh persamaan (18), nilai-nilai I_1 , I_2 dan I_3 diperoleh dari persamaan (19a) – (19c) sebagai berikut:

$$I_1 = -\frac{A_2}{A_1} = 6,8120;$$

$$I_2 = \frac{A_3}{A_1} = 0,3594;$$

$$I_3 = -\frac{A_4}{A_1} = -0,1622.$$

Dengan demikian persamaan (18) menjadi:

$$\alpha^3 - 6,8120 \alpha^2 + 0,3594 \alpha + 0,1622 = 0$$

Dari persamaan (20a) dan (20b) diperoleh:

$$a_o = \frac{(I_1^2 - 3I_2)}{3} = 15,1082;$$

$$b_o = \frac{(2I_1^3 - 9I_1I_2 + 27I_3)}{27} = 22,4361.$$

Karena $27b_o^2 - 4a_o^3 < 0$, yaitu $-203,6020 < 0$ maka berlaku persamaan (22a) – (22d):

$$\cos \phi = \frac{3\sqrt{3}(b_o)}{2a_o^{3/2}} = 0,9926;$$

$$\phi = 0,1216 \text{ radian};$$

$$\alpha_1 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{\phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} = 6,7552;$$

$$\alpha_2 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{2\pi + \phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} = -0,1292;$$

$$\alpha_3 = 2\left(\frac{a_o}{3}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{4\pi + \phi}{3}\right) + \frac{I_1}{3} = 0,1859.$$

Dari nilai-nilai tersebut yang memenuhi adalah nilai α yang non-negatif dan < 1 sehingga diambil

$$\alpha = 0,1859.$$

Tinggi blok desak beton menjadi $a = 0,1859 \times 439 = 81,61 \text{ mm}$.

Periksa apakah tegangan baja desak sesuai dengan yang dimisalkan dengan persamaan (5b):

$$f'_s = 600 \left(1 - \beta_1 \frac{d'}{a} \right) = 218,84 \text{ MPa} < f_y = 400 \text{ MPa (cocok)}$$

Selanjutnya rasio tulangan dihitung dengan persamaan (7):

$$\rho = 0,85 \alpha \frac{f'_c}{f_y} \frac{1}{\left(1 - \delta \frac{f'_s}{f_y} \right)} = 0,0109.$$

Luas tulangan tarik yang diperlukan menjadi $A_s = \rho b d = 1432,51 \text{ mm}^2$. Luas tulangan desak $A'_s = \delta A_s = 0,5 A_s = 716,26 \text{ mm}^2$. Dipasang $A_s = 4D22$ dan $A'_s = 2D22$.

Contoh 2: Tulangan desak sudah luluh

Diketahui suatu balok anak beton bertulang dengan $b = 300 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$, $f'_c = 20 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$ dan $M_u = 300 \text{ kNm}$. Hitung tulangan yang diperlukan jika akan digunakan rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik $\delta = 0,25$.

Penyelesaian:

Mengingat momen yang harus didukung relatif besar dan δ relatif kecil dianggap baja desak sudah luluh. Dianggap tulangan tarik terdiri dua lapis tulangan dengan jarak dari serat tarik ke titik berat tulangan tarik diperkirakan = 85 mm, sehingga tinggi efektif $d = 500 - 85 = 415 \text{ mm}$. Tulangan desak dianggap satu lapis dengan $d' = 61 \text{ mm}$, sehingga $\gamma = \frac{d'}{d} = 0,147$.

$$\text{Tahanan momen: } R_n = \frac{M_n}{bd^2} = \frac{300 \times 10^6}{0,8 \times 300 \times 415^2} = 7,2579 \text{ MPa.}$$

Digunakan persamaan (14):

$$8,5\alpha^2 - 21,8337\alpha + 7,2579 = 0$$

Akar-akar persamaan adalah:

$$\alpha_1 = 2,1763;$$

$$\alpha_2 = 0,3923 \text{ (dipakai).}$$

Tinggi blok desak beton $a = 162,82 \text{ mm}$.

Periksa tegangan baja desak dengan persamaan (5b), diperoleh $f'_s = 408,94 \text{ MPa} > f_y = 400 \text{ MPa}$ (anggapan benar).

Selanjutnya rasio tulangan dihitung dengan persamaan (7) dengan mensubstitusikan $f'_s = f_y$, sehingga diperoleh

$$\rho = 0,0222.$$

Luas tulangan tarik menjadi $A_s = \rho b d = 2768,01 \text{ mm}^2$. Luas tulangan desak $A'_s = \delta A_s = 692 \text{ mm}^2$. Dipasang $A_s = 8D22$ dan $A'_s = 2D22$

Periksa jarak dari serat tarik ke titik berat tulangan tarik = 84 mm < 85 mm → OK.

5. PERSYARATAN TULANGAN MINIMUM DAN MAKSIMUM

Persyaratan tulangan maksimum dan minimum harus mengikuti SNI-03 2847 2002. Tulangan terpasang dari hasil hitungan harus memenuhi persyaratan yang diatur dalam peraturan.

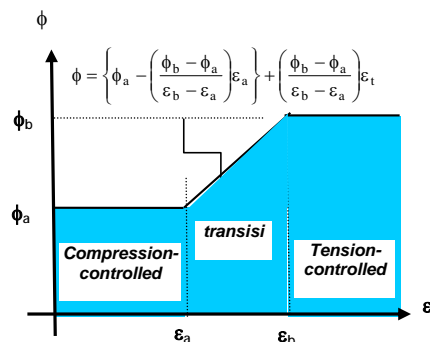
6. FAKTOR REDUKSI KEKUATAN DAN TIPE KERUNTUHAN

Faktor reduksi kekuatan berdasarkan SNI 02 2847 2002 untuk elemen yang mengalami lenturan diambil $\phi = 0,8$. Namun ACI 318-08 menganut faktor reduksi kekuatan yang berbeda dengan mendasarkan pada regangan serat tarik terluar. Suatu tampang dibedakan menjadi: *tension controlled*, *compression controlled* dan transisi. Apabila suatu tampang merupakan tampang dengan *tension controlled* maka faktor reduksi kekuatan $\phi = 0,9$. Apabila suatu tampang merupakan *compression controlled* maka faktor reduksi kekuatan $\phi = 0,65$. Untuk tampang transisi faktor reduksi kekuatan bernilai antara 0,65 sampai dengan 0,9. Menurut ACI 318-08, suatu tampang merupakan *tension-controlled* jika regangan tarik neto pada baja tulangan terluar adalah sama atau lebih besar dari 0,005 pada saat beton desak mencapai regangan 0,003. Sedangkan suatu tampang dikatakan *compression-controlled* jika regangan tarik neto pada baja tulangan terluar sama atau lebih kecil dari regangan pada keadaan seimbang.

Apabila nilai faktor reduksi kekuatan akan disesuaikan dengan konsep ini, maka dapat mengikuti yang telah dibahas dalam Arfiadi (2005). Secara umum jika batas faktor reduksi kekuatan untuk *compression controlled* adalah ϕ_a , batas faktor reduksi kekuatan untuk *tension controlled* adalah ϕ_b , batas regangan tarik neto baja terluar pada kondisi *compression controlled* adalah ε_a dan batas regangan tarik neto baja terluar pada kondisi *tension controlled* adalah ε_b , maka faktor reduksi kekuatan pada daerah transisi dapat diambil dengan mengacu pada Gambar 2 sebagai berikut (Arfiadi, 2005):

$$\phi = \left\{ \phi_a - \left(\frac{\phi_b - \phi_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \varepsilon_a \right\} + \left(\frac{\phi_b - \phi_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \varepsilon_t \quad (22)$$

Untuk perencanaan dapat digunakan nilai ϕ yang maksimum terlebih dahulu, setelah nilai tinggi blok desak beton diperoleh lalu diperiksa apakah tampang masih termasuk *tension controlled* atau tidak.



Gambar 2. Faktor reduksi kekuatan menurut *unified design method*

7. KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dibahas solusi eksak balok beton bertulang yang mengalami lenturan jika rasio tulangan desak terhadap tulangan tarik. Persamaan yang dihasilkan merupakan persamaan kuadrat jika baja desak sudah luluh dan persamaan pangkat tiga jika baja desak belum luluh. Dari contoh yang disajikan perencanaan tulangan dapat dilakukan dengan mudah.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318 (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Arfiadi, Y. (2005). "Antisipasi penggunaan unified design provision pada pengajaran struktur beton di Indonesia". *Lokakarya Pengajaran Mekanika Rekayasa dan Struktur Beton*, III-81 – 93, ITS, Surabaya
- Purwono, R., Tavio Imran, I. dan Raka, IGP (2008). *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-2002) dilengkapi dengan penjelasan (S-2002)*. ITS Press, Surabaya.
- Karasudhi, P. (1992). *Mathematical foundations for continuum mechanics*. Asian Institute of Technology, Bangkok.