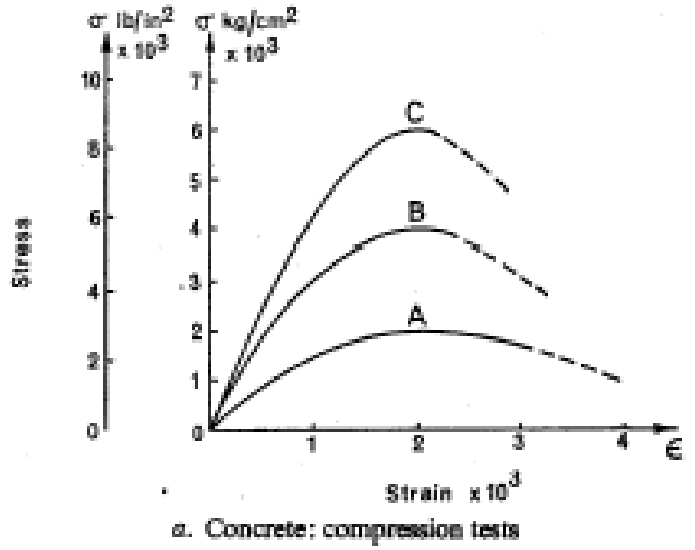
KEKUATAN BATAS : LENTUR

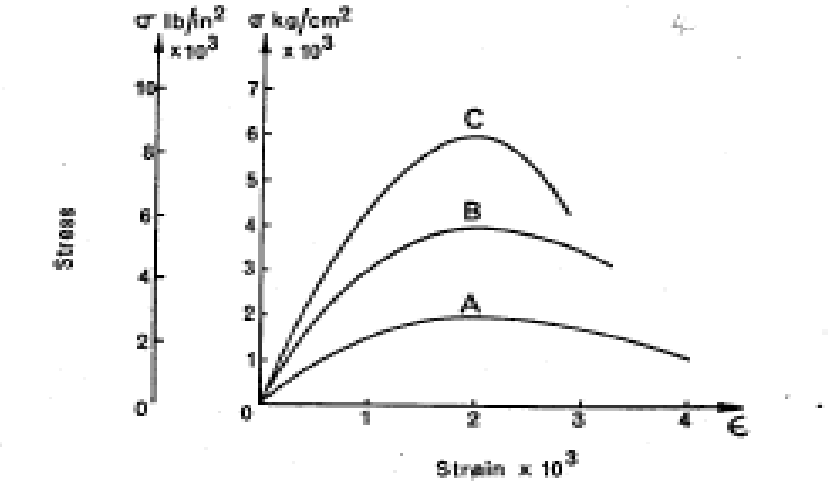
2.1 Kekuatan batas dari batang-batang beton bertulang dalam lentur tergantung keadaan tegangan-regangan dari beton dan bajanya. Bentuk tipikal kurva tegangan dan regangan untuk beton dan baja pada waktu pembebanan singkat diperlihatkan dalam Gambar.2.1., Gambar.2.1a adalah hasil dari tes tekan silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm (6 in. x 12 in.) dan Gambar.2.1b adalah hasil tes lentur. Bagian titik-titik dari kurva pada Gambar.2.1a tidak dapat ditentukan secara normal dengan pengetesan mesin sederhana, selama pengetesan pengeluaran energi regangan yang tersimpan dalam mesin selalu menyebabkan bahan hancur di ujungnya. Secara praktis karakteristik tegangan-regangan bagian balok beton bertulang yang ditekan akan mendekati bentuk kurva dari Gambar.2.1b, ini menunjukan kemampuan regangan batas yang nyata dalam lentur.



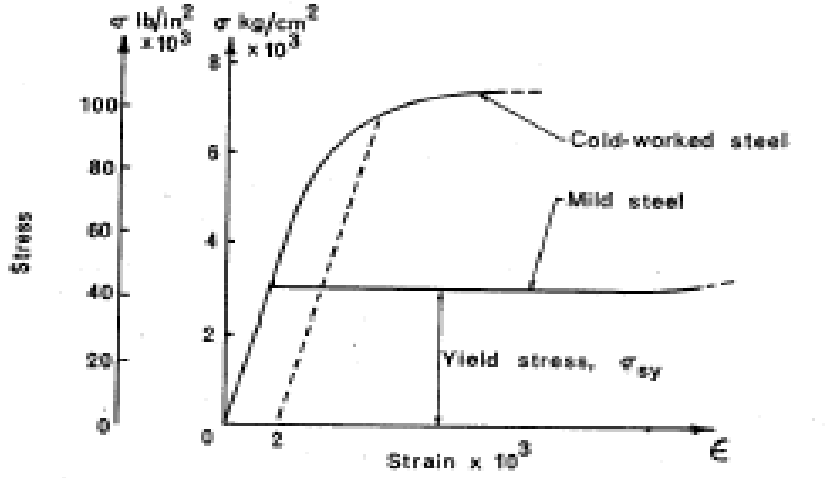
a. Concrete: compression tests

A: low strength B: medium strength C: high strength

Gambar 2.1. Bentuk kurva tegangan-regangan untuk beton dan baja



b. Concrete: flexure tests (A, B, C as Fig. 2.1*a*)



c. Steel

Fig. 2.1. (*continued*)

Gambar 2.1. (lanjutan)

Berdasarkan kurva untuk beton dalam Gambar 2.1., didapat 3 kesimpulan yang dijelaskan sebagai berikut :

1. Hubungan tegangan-regangan untuk beton adalah tidak linier, tetapi kesalahan dalam pengasumsian kelinieran terhadap tegangannya yang berkisar 1/3 dari nilai maksimumnya, tidaklah serius. Ini dapat dibenarkan untuk penggunaan garis lurus, tidak ada teori tarik yang berlaku untuk disain beban kerja pada beton pratekan.
2. Regangan yang terjadi saat tegangan maksimum berkisar 0.002 untuk semua (kualitas) beton.

3. Regangan maksimum pada beton dapat bervariasi tergantung kekuatan betonnya tetapi secara umum nilainya berkisar dari 0.0025 sampai 0.004.

2.2. Asumsi berikut dibuat dalam penurunan rumus untuk kuat batas lentur dari batang beton bertulang :

a) Distribusi regangan yang melintang setinggi batang dalam lentur berbentuk linier hingga mencapai keadaan hancur.

b) Balok akan hancur saat regangan tekan maksimum dalam beton tercapai, yang nilainya tergantung kualitas beton tersebut.

c) Bentuk diagram tegangan untuk beton yang mencapai keruntuhan didapat sepenuhnya dengan pemakaian koefisien.

d) Beton tidak menahan tarikan.

e) Regangan dalam baja merupakan suatu proporsi tertentu dari regangan betonnya pada kondisi/level yang sama.

Validitas dari asumsi (a) & (b) telah dibuktikan dengan tes eksperimen. Asumsi (d) tidak begitu benar, tetapi kuat tarik dari beton sangatlah kecil dibandingkan dengan kekuatan tekannya, dengan begitu kurang tepat jika menghilangkan kekuatan tarik tersebut. Asumsi (e) menyatakan pengaruh faktor ikatan antara beton dan tulangan tarik adalah konstan. Untuk beton bertulang yang umum, ikatan beton dan tulangannya ini dianggap bersatu, tetapi untuk beton pratekan nilai faktor tersebut, dalam kasus-kasus tertentu, kurang dari satu.

Gambar 2.2. menunjukan distribusi tegangan & regangan saat keruntuhan pada balok beton persegi yang bertulangan tarik saja.. Saat diagram regangannya linier (Gambar 2.2b), distribusi tegangan dari gambar 2.2c didapat dari hasil kurva tegangan-regangan beton pada Gambar 2.1b.

Koefisien yang diperlukan untuk menentukan bentuk dari diagram distribusi tegangan dalam beton (sering disebut blok tegangan) biasanya ditulis dengan k_1, k_2 dan k_3 , ini merupakan rasio yang didapat dari :

$$k_1 = \frac{tegangan\ rata-rata\ dalam\ beton}{tegangan\ maximum\ dalam\ beton}$$

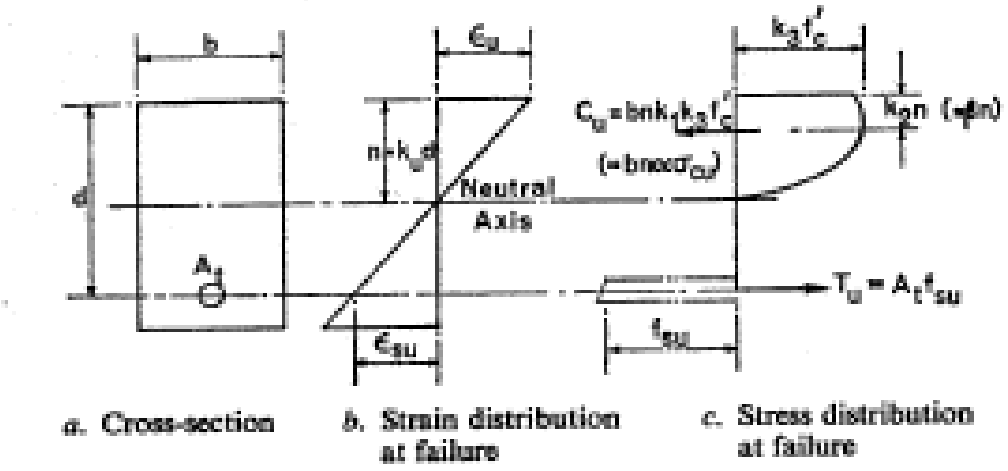
$$k_2 = \frac{tinggi\ \ jarak\ terhadap\ gaya\ resul\tan tekan}{tinggi\ \ jarak\ terhadap\ sumbu\ netral}$$

$$k_3 = \frac{tegangan\ maksimum dalam\ beton}{kuat\ tekan\ silinder}$$

Beberapa penulis merujuk penggunaan koefisien yang dipakai hanya 2 koefisien, biasanya α dan β, dimana :

$$\alpha = \frac{tegangan\ rata - rata\ dalam\ beton}{kuat\ tekan\ kubus}$$

$$\beta = \frac{tinggi\ \ jarak\ terhadap\ gaya\ resul\ tan\ tekan}{tinggi\ \ jarak\ terhadap\ sumbu\ netral}$$



Gambar 2.2. Kondisi keruntuhan suatu balok persegi beton bertulang dalam lentur

Keterangan :

b = lebar balok
d = tinggi efektif balok
A_t = luas penampang tulangan baja tarik
n = tinggi jarak terhadap sumbu netral (ini tidak sama dengan jarak terhadap sumbu netral pada kondisi beban kerja yang didapat dengan teori elastis)
ε_u = regangan batas dalam beton
ε_{su} = regangan rata-rata tulangan baja saat balok mengalami runtuh
f_{su} = tegangan baja pada saat balok runtuh
f_c' = kuat tekan beton silinder
σ_{cu} = kuat tekan beton kubus

k_1, k_2, k_3, α , β = koefisien yang ditetapkan dari bentuk diagram tegangan dalam beton
T_u = gaya resultan tarik pada keruntuhan balok
C_u = gaya resultan tekan pada keruntuhan balok

2.3. Dari analisa gaya-gaya yang bekerja dalam Gambar 2.2c, maka momen batas dari balok , penurunan rumusnya sbb :

Persamaan gaya horizontal : $C_u = T_u$

Maka, $b\ n\ k_1\ k_3\ f_c' = A_t\ f_{su}$

Jadi, $$n = \frac{A_t}{b}\frac{f_{su}}{k_1 k_3 f_c'} \qquad (2.1)$$

(ini tidak akan sama dengan tinggi jarak sumbu netral pada kondisi beban kerja sebagaimana didapat dengan teori elastis)

Jarak lengan dalam dari 2 gaya kopel = $d - k_2 n$

Maka momen batasnya, $M_u = C_u\ (d - k_2 n)$

Jadi, $M_u = b\ n.\ k_1\ k_3\ f_c'.\ (d - k_2 n)$ (2.2)

Atau, $$M_u = A_t f_{su}\ d\left(1 - \frac{k_2}{k_1 k_3}\frac{A_t}{bd}\frac{f_{su}}{f_c'}\right) \qquad (2.3)$$

2.4. Jika tulangan baja yang dipakai mencapai titik lelehnya, seperti yang dimiliki baja lunak (Gambar 2.1c), kemudian luas penampang tulangan bajanya adalah A_t , dimana tegangan bajanya mencapai tegangan leleh σ_{sy} sebelum regangan maksimum dalam beton mencapai nilai batas ε_u, maka pada pesamaan 2.3 dapat dituliskan $f_{su} = \sigma_{sy}$ sehingga :

$$M_u = A_t\ \alpha_{sy}\ d\left(1 - \frac{k_2}{k_1 k_3}\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{f_c'}\right) \qquad (2.4)$$

dan jika $A_t\ \sigma_{sy}\ /\ bd\ f_c'$ yang disebut sebagai proporsi efektif dari baja dan kadang-kadang disebut sebagai indeks tulangan tarik, ditulis q, maka :

$$\frac{M_u}{bd^2} = q f_c'\left(1 - \frac{k_2}{k_1 k_3} q\right) \qquad (2.5)$$

Jenis keruntuhan ini diawali dengan melelehnya baja dimana kejadiannya secara berangsur-angsur, dalam keadaan momen lentur yang konstan, dengan begitu sumbu netral bergerak keatas sampai luasan beton yang menahan gaya resultan tekan tidak mencukupi lagi, dan akhirnya beton mulai hancur. Jenis keruntuhan ini disebut keruntuhan tarik awal (*primary tension failure*), dan baloknya dikatakan bertulangan lemah (*under-reinforced*) pada saat kondisi keruntuhannya.

2.5. Jika prosentase tulangan baja mencukupi sehingga tidak tercapai leleh pada bajanya, maka akan terjadi keruntuhan pada serat terluar dari beton saat mencapai regangan batasnya . Keadaan ini merupakan hal yang penting untuk menetapkan regangan baja dan beton berdasarkan momen batasnya.

Dari diagram regangan, Gambar 2.2b.

$$\frac{n}{d} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{su} + \varepsilon_u} = k_u$$

dimana : $k_u = \dfrac{tinggi\ jarak\ terhadap\ sumbu\ netral\ saat\ hancur}{tinggi\ jarak\ efektif}$

tetapi regangan baja : $\varepsilon_{su} = f_{su}/E_s$, dimana E_s = modulus elastis baja.

Jadi : $$k_u = \frac{\varepsilon_u}{\frac{f_{su}}{E_s} + \varepsilon_u} \qquad (2.6)$$

dan persamaan gaya internal nya :

$$A_t f_{su} = b\ k_u d\ k_1 k_3\ f_c' \qquad (2.7)$$

Eliminasi f_{su} dari persamaan (2.6) dan (2.7) , menghasilkan :

$$k_u = \sqrt{\left\{ \frac{A_t}{bd} \frac{E_s \varepsilon_u}{k_1 k_3 f_c'} + \left(\frac{1}{2} \frac{A_t}{bd} \frac{E_s \varepsilon_u}{k_1 k_3 f_c'} \right)^2 \right\}} - \frac{1}{2} \frac{A_t}{bd} \frac{E_s \varepsilon_u}{k_1 k_3 f_c'}$$

jika $p = \dfrac{A_t}{bd}$ *dan* $m_p = \dfrac{E_s \varepsilon_u}{k_1 k_3 f_c'}$ maka :

$$k_u = \sqrt{\left\{ p\,m_p + \left(0.5\,p\,m_p\right)^2 \right\}} - 0.5\,p\,m_p \qquad (2.8)$$

dimana m_p adalah ratio modulus plastis.

Momen batasnya adalah :

$$M_u = b\,k_{u.}d\,k_{1.}k_{3.}f_c'\,(d - k_{2.}k_{u.}d)$$

$$= b\,k_u\,d^2\,k_1\,k_3\,f_c'\,(1 - k_2\,k_u) \qquad (2.9)$$

Jenis keruntuhan ini disebut keruntuhan tekan awal (*primary compression failure*) dan balok yang mengalami keadaan ini disebut bertulangan kuat (*over reinforced*) saat keruntuhannya. Pada keadaan sebenarnya kondisi seperti ini tidak dikehendaki dimana suatu balok akan runtuh dengan memerlukan ratio baja yang tinggi saat keruntuhan tekan awal. Keadaan type keruntuhan seperti ini merupakan cara yang jelek dalam melakukan disain.

2.6. Untuk keadaan dimana bajanya mecapai tegangan leleh pada saat yang sama dengan tercapainya regangan batas dalam beton, ini disebut sebagai keruntuhan seimbang (*balance failure*). Dalam hal ini dari persamaan (2.4) dan (2.9) keduanya digabung,

$$M_u = A_t\,\sigma_{sy}\,d\left(1 - \frac{k_2}{k_1 k_3}\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{f_c'}\right) \qquad (2.4)$$

dan

$$M_u = b\,k_u\,d^2\,k_1\,k_3\,f_c'\,(1 - k_2\,k_u) \qquad (2.9)$$

Maka : $A_t\,\sigma_{sy} / bd\,f_c' = k_1\,k_3\,k_u$

Untuk keruntuhan seimbang, $k_u = \varepsilon_u/(\varepsilon_{sy} + \varepsilon_u)$

Dimana :

ε_{sy} = regangan baja saat mulai leleh

jika simbol q untuk keadaan keruntuhan seimbang ditulis dengan q_b maka :

$$q_b = k_1 k_3 \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_u} \qquad (2.10)$$

Kondisi type keruntuhan ini sangat baik untuk suatu disain, dimana q selalu lebih kecil dari q_b dengan demikian pertanda akan terjadi keruntuhan pada struktur ditandai dengan adanya keretakan yang besar dan timbulnya lendutan.

Pada keadaan keruntuhan tekan awal dan keruntuhan seimbang dapat terjadi tiba-tiba tanpa peringatan awal terlebih dahulu.

2.7. Jika tulangan baja yang dipakai tidak dapat ditetapkan nilai titik lelehnya, seperti untuk baja yang dibuat dengan proses dingin (Gambar 2.1c), maka σ_{sy} yang diambil harus sama dengan nilai patokan tegangan leleh yang diizinkan atau nilai tegangan yang menghasilkan regangan tetap baja sebesar 0.2% .

Alternatif lainnya, jika tersedia kurva tegangan-regangan penuh untuk bajanya, prosedur berikut dapat dipakai, berdasarkan pada kompatibilitas regangannya :

1. Asumsikan nilai k_u dan hitung nilai ε_{su} dari gambar 2.2b
2. Dari kurva tegangan-regangan untuk baja tentukan tegangan f_{su} untuk regangan tersebut.
3. Hitung $C_u = b\, k_u\, d\, k_1\, k_3\, f_c'$ *dan* $T_u = A_t\, f_{su}$, jika hasilnya bernilai sama maka nilai k_u yang diasumsikan adalah benar.
4. Jika C_u lebih besar dari T_u, maka asumsi nilai k_u terlalu besar dan harus diulang lagi tahap 1- 3 diatas sampai tercapai kesamaan antara C_u dan T_u.

2.8. Nilai-nilai dari k_1, k_2, k_3, ε_u dll.

Koefisien-koefisien yang menentukan bentuk blok tegangan pada kondisi keruntuhan, dan kapasitas regangan batas dari beton penurunan rumusannya berdasarkan eksperimen. Banyak penulis yang telah mengemukakan nilai empirik untuk hal tersebut, tetapi nilai yang diterima secara umum dan cukup baik adalah yang dikemukakan oleh *Hognestad*, *Hanson* dan *Mc Henry*. Nilai tersebut seperti diberikan dalam Tabel 2.1, berdasarkan kekuatan beton silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm (12 in. x 6 in.)

Hubungan antara kekuatan beton yang diukur dengan tes silinder serta yang diukur dengan tes kubus tidaklah eksak, kekuatan silinder berkisar 2/3 atau 0.85 dari kekuatan kubusnya, tetapi sudah cukup aman jika diambil nilai 0.78.

Tabel 2.2 memberikan nilai-nilai parameter kekuatan batas dari kubus 15 cm (6 in.), yang dikonversikan dengan ratio diatas.

Tabel 2.1

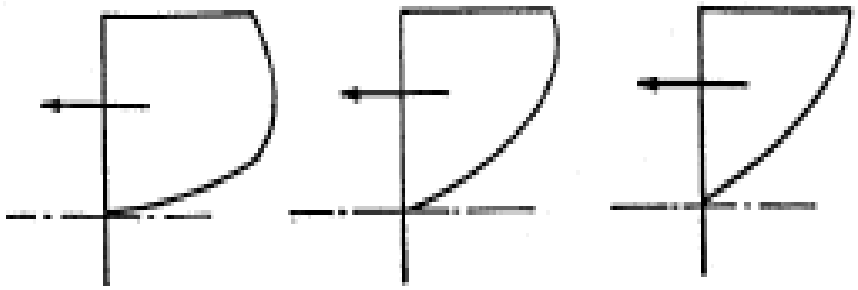
Nilai-nilai dari k_1, k_2, k_3, *dan* ε_u berdasarkan uji kekuatan silinder

	f_c' dalam kg/cm^2	f_c' dalam lb/in.^{2}
k_1	$0.94 - \frac{f_c'}{1{,}830}$	$0.94 - \frac{f_c'}{26{,}000}$
k_2	$0.50 - \frac{f_c'}{5{,}625}$	$0.5 - \frac{f_c'}{80{,}000}$
$k_1 k_3$	$\frac{275 + 0.35 f_c'}{225 + f_c'}$	$\frac{3{,}900 + 0.35 f_c'}{3{,}200 + f_c'}$
ε_u	$0.004 - \frac{f_c'}{4.57x10^5}$	$0.004 - \frac{f_c'}{6.5x10^6}$

Tabel 2.2
Nilai k_1, α, β, dan ε_u berdasarkan uji kekuatan Kubus
(berdasarkan asumsi sama dengan 0.78 x kekuatan silinder)

	σ_{cu} dalam kg/cm^2	σ_{cu} dalam lb/in.^{2}
k_1	$0.94 - \frac{\sigma_{cu}}{2{,}350}$	$0.94 - \frac{\sigma_{cu}}{33{,}400}$
$\beta\ (= k_2)$	$0.50 - \frac{\sigma_{cu}}{7{,}200}$	$0.50 - \frac{\sigma_{cu}}{102{,}500}$
$\alpha\ (= k_1 k_3 \frac{f_c'}{\sigma_{cu}})$	$\frac{214 + 0.213\sigma_{cu}}{225 + 0.78\sigma_{cu}}$	$\frac{3{,}040 + 0.213\sigma_{cu}}{3{,}200 + 0.78\sigma_{cu}}$
ε_u	$0.004 - \frac{\sigma_{cu}}{5.85x10^5}$	$0.004 - \frac{\sigma_{cu}}{8.34x10^6}$

Dari analisa hubungan hasil tabel 2.1 dan tabel 2.2, ternyata bahwa bentuk blok tegangan (*stress block*) berubah secara drastis saat kekuatan betonnya bertambah. Gambar 2.3 menunjukan perubahan yang sebenarnya berdasarkan perubahan dari kekuatannya.



a. Low strength concrete *b.Medium strength* *c. High strength*

Gambar 2.3. Type distribusi tegangan balok beton bertulang saat keruntuhan

Beton dengan masa waktu 28 hari , kekuatan kubusnya 250 kg/cm^2 (3,550 lb/in^2) adalah jenis beton struktur dicetak ditempat dan untuk nilai-nilai parameter blok tegangannya dihitung dari data tabel 2.2 sebagai berikut :

$k_1 = 0.834$

$k_2 = \beta = 0.464$

$\alpha = 0.977$

$\varepsilon_u = 0.356$

Hubungan yang diberikan pada Tabel 2.1 dan 2.2 adalah merupakan hasil penempatan persamaan garis terhadap titik-titik scater dari hasil eksperimennya, dengan demikian hasilnya tentu saja tidak begitu akurat. Pada prakteknya, untuk semua beton struktur yang normal dengan kekuatan kubus sampai berkisar 350 kg/cm^2 (5,000 lb/in.^{2}) biasanya didapatkan nilai pendekatan seperti dibawah ini :

$k_1 = 0.85$

$k_2 = \beta = 0.5.\ k_1 = 0.425$

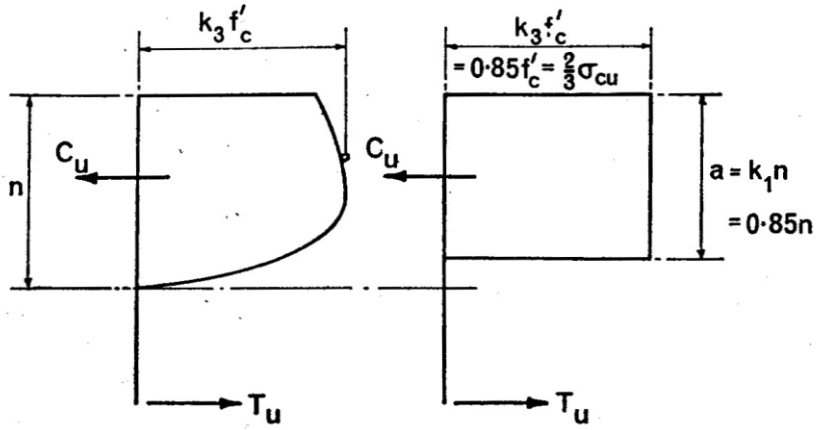
k_3 = 0.85

α = 0.57

ε_u = 0.003 atau 0.00333

2.9. Distribusi Tegangan Segiempat dari Beton.

Asumsi sebagai dasar dari desain, bahwa distribusi tegangan dalam beton saat kehancuran suatu batang dalam lentur adalah persegi empat, pertama kali ditemukan di Austria tahun 1904, tetapi pada penggunaan secara modern umumnya berdasarkan Tulisan dari Whitney [2] di tahun 1940. Teori Whitney merupakan dasar aturan desain di banyak negara, termasuk India, Britain dan USA. Asumsi ini menyatakan distribusi tegangan yang parabolis dalam beton saat kehancuran dapat digantikan dengan suatu blok tegangan persegi empat, yang luasnya sama dengan luas kurva tegangan pada diagram tegangan tersebut, seperti yang ditunjukan dalam gambar 2.4, dan resultan gayanya sama tinggi dari serat atasnya.



a. Actual *b.* Assumed

Gambar 3.4. Blok Tegangan segiempat dalam balok beton bertulang saat keruntuhan

Asumsi dari *Whitney* selaras dengan nilai pendekatan parameter kekuatan batas yang diambil dari bagian sebelumnya untuk beton struktur normal, tetapi untuk beton

berkekuatan tinggi, misalnya diatas 350 kg/cm^2 (5000 lb/in.^{2}), seperti yang dipakai dalam beton pratekan, tentu saja asumsi tersebut tidak tepat.

Dari diagram tegangan Gambar 2.4b

$$T_u = A_t \,.\, f_{su} = C_u = b\,a\,\frac{2}{3}\sigma_{cu}$$

Jadi, $$a = \frac{A_t}{b}\,\frac{f_{su}}{\frac{2}{3}\sigma_{cu}} \qquad (2.11)$$

Dan $$M_u = A_t\, f_{su}\,(d - 0.5a) \qquad (2.12)$$

Atau $$M_u = ba\frac{2}{3}\sigma_{cu}(d - 0.5a) \qquad (2.13)$$

Jika bajanya meleleh, $f_{su} = \sigma_{sy}$ dan persamaan (2.12) menjadi

$$M_u = A_t\,\sigma_{sy}\,d\left(1 - 0.75\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}\right) \qquad (2.14)$$

Atau bila ditulis ratio $\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}$ dengan q_c,

$$M_u = q_c\, bd^2\,\sigma_{cu}\,(1 - 0.75\,q_c) \qquad (2.15)$$

Untuk kekuatan beton silinder, persamaan (2.15) menjadi

$$M_u = q\, bd^2\, f_c'\,(1 - 0.59\,q) \qquad (2.16)$$

Dimana : $$q = \frac{A_t}{bd}\,\frac{\sigma_{sy}}{f_c'}$$

Untuk keruntuhan seimbang $k_u = \varepsilon_u / (\varepsilon_{sy} + \varepsilon_u)$ dan untuk baja lunak dengan tegangan leleh 2,800 kg/cm^2 (40,000 lb/in.^{2}) dan modulus elastis 2.1 x 10^6 kg/cm^2 (30 x 10^6 lb/in.^{2})

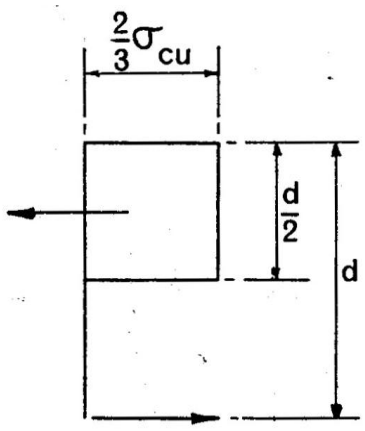
ε_{sy} = 2,800/2.1 x 10^6 = 0.00133

Dengan demikian k_u = 0.0033/0.0046 = 0.72

dan a = tinggi dari blok tegangan persegi

= $k_1 n = k_1 k_u d$ = 0.85 x 0.72 d = 0.61d

Untuk meyakinkan bahwa keruntuhan terjadi dengan didahului adanya tanda-tanda peringatan keruntuhan biasanya dilakukan desain dengan tinggi batas blok tegangn persegi, sama seperti pada aturan India dan Inggris. Bahasan yang terinci dari beberapa aturan lainnya dibahas pada bagian 2.15. Jika nilai maksimum a diambil sama dengan 0.5d, seperti blok tegangan yang ditunjukan pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Blok tegangan segiempat pada jarak maksimum

Maka momen keruntuhan seimbangnya adalah :

$$M_u = 0.5\, bd\, \frac{2}{3}\sigma_{cu}\left(d - 0.5\, x 0.5d\right)$$

$$= \frac{1}{4}bd^2\sigma_{cu} \qquad (2.17)$$

atau untuk kekuatan silinder,

$$M_u = \frac{1}{3}bd^2 f_c' \qquad (2.18)$$

Untuk a = 0.5 d,

$$q_c = \frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}} = 0.333 \qquad (2.19)$$

dan $$q=\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{f_c'}=0.425 \qquad (2.20)$$

2.10. Suatu contoh metoda perhitungan kekuatan batas balok beton bertulang pada balok persegi dengan ukuran tinggi efektif 60 cm (24 in.) dan lebar balok 40 cm (15.7 in.). Luas tulangan baja 40 cm² (6.2 in.²) dan tegangan lelehnya 2,800 kg/cm² (40,000 1b/in.²). Kekuatan tekan kubus dari beton adalah 250 kg/cm² (3,555 1b/in.²).

Hal pertama yang penting adalah menjadikan bajanya meleleh terlebih dahulu sebelum betonnya hancur.

Pada nilai maksimum tinggi blok tegangan, a = 0.5 d, maka :

gaya total betonnya $=\frac{2}{3}x250\,x40\,x\frac{1}{2}60\,kg=200{,}000\,kg$

Pada kondisi baja leleh, gaya total bajanya = 40 x 2,800 = 112,000 kg.

Jadi baja akan meleleh terlebih dahulu sehingga balok akan runtuh dengan type keruntuhan tarik primer.

Dari persamaan (2.11) :

$$a=\frac{40}{40}\frac{2{,}800}{\frac{2}{3}250}=16.8\,cm$$

Dari persamaan (2.12) :

M_u = 112,000 (60 – 0,5 x 16,8) kg cm = 5,578,000 kg cm (5,020,000 1b in.)

Suatu pendekatan lainnya untuk masalah yang sama diatas dengan menghitung terlebih dahulu q_c, dan hasilnya dapat dibandingkan dengan nilai keruntuhan seimbang dari persamaan (2.19) sebagai berikut **:**

$$q_c=\frac{40}{40\,x60}\frac{2{,}800}{250}=0.187$$

Hasilnya ternyata kurang dari 0.333, dengan demikian balok akan runtuh dengan type keruntuhan tarik primer, kemudian berdasarkan persamaan (2.15) :

M_u = 0.817 x 40 x 60² x 250 (1 – 0.7 x 0.187)

= 5,780,000 kg cm (sama dengan nilai terdahulu)

Jika luas baja tulangan adalah 120 cm² (18.6 in.²) maka gaya total bajanya pada kondisi leleh 120 x 2,800 = 336,000 kg, sehingga beton akan kritis terhadap keruntuhan, kondisi ini disebut keruntuhan tekan primer.

Pada kejadian ini, berdasarkan persamaan (2.17)

M_u = ¼ x 40 x 60² x 250 kg cm

= 9,000,000 kg cm (7,800,000 1b in.)

Dengan cara lain, q_c = 120 x 2,800 / (40 x 60 x 250) = 0.56 , menunjukan hasilnya yang lebih besar dari 0.333, maka balok akan runtuh dengan type keruntuhan tekan primer dan *Mu* dapat dihitung dari persamaan (2.17).

2.11. Prosedur Disain untuk Momen Batas

Momen batas disain yang diperlukan didapat dari hasil momen akibat beban yang bekerja dikali dengan suatu faktor yang disebut faktor beban (*load factor),* momen batas disain ini disebut momen disain terfaktor (*factored design moment).* Pembahasan tentang metoda dalam menentukan nilai faktor beban dibahas pada Bab 10., tetapi telah banyak peraturan yang dapat dipakai seperti dalam I.S. 456 : 1964, sebagai contoh, faktor untuk beban hidup adalah 2,2 dan untuk beban mati adalah 1,5

Untuk mengetahui momen batas yang diperlukan dalam disain suatu penampang melintang balok dapat dijelaskan berikut ini. Secara umum ada dua macam kasus yang mungkin terjadi dalam prakteknya. Kasus pertama, diketahui bahan baja serta betonnya, kemudian dihitung dimensi penampang melintang dan luas tulangannya. Pada kasus yang kedua dimensi beton dan faktor-faktor luar lainnya telah ditentukan, kemudian akan dihitung hanya luas tulangannya saja.

Kasus 1.

Diketahui momen batas yang diperlukan, kekuatan beton kubus, dan tegangan leleh bajanya. Akan dihitung dimensi penampang melintang balok dan luas tulangan yang memenuhinya.

1. Dimisalkan nilai yang memadai untuk p = At/bd, misalnya 1 % atau 2 %. Pemilihan nilai p tergantung pengalaman perancangnya, dan pengetahuannya tentang biaya rata-rata dari beberapa hal seperti bekisting, bahan material,

pemasangan tulangan dsb. yang dapat memperkirakan biaya total untuk struktur beton bertulang. Perkiraan biaya tersebut dapat bervariasi dari tempat yang satu dengan tempat yang lain dan dari waktu ke waktu yang lain, dan nilai paling ekonomis *p* sangatlah diperlukan.

2. hitung $q_c = p\left(\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}\right)$, jika nilainya lebih besar dari 0.333 maka tulangan tekan diperlukan.
3. Pilih nilai lebar balok b atau dari rasio b/d
4. Tentukan nilai d dari rumusan :

$$M_u = q_c b d^2 \sigma_{cu}\left(1 - 0.75 q_c\right) \qquad (2.15)$$

5. Bulatkan nilai b dan d yang didapat secara proporsional sesuai kondisinya.
6. Hitung luas tulangan baja yang diperlukan dari rumusan :

$$M_u = A_t \sigma_{sy} d\left(1 - 0.75 \frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}\right) \qquad (2.14)$$

Kasus 2.

Diketahui momen batas yang diperlukan, kekuatan beton kubus, tegangan baja leleh, dan dimensi penampang melintang, hitung luas tulangan baja yang diperlukan :

1. Hitung momen keruntuhan seimbangnya berdasarkan :

$$M_u = \frac{1}{4} b d \frac{2}{3} \sigma_{cu} \qquad (2.17)$$

2. Jika momen batas yang diperlukan melebihi nilai hasil hitungan dari tahap 1, maka dimensi penampang melintangnya harus diperbesar, atau tulangan tekannya ditambah.
3. Hitung luas tulangan baja yang diperlukan berdasarkan rumus

$$M_u = A_t \sigma_{sy} d\left(1 - 0.75 \frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}\right) \qquad (2.14)$$

Sebagai contoh disain balok dengan faktor disain momen lentur 1,000,000 kg.cm (867,000 1b.in) memakai beton masa waktu 28 hari yang kekuatan kubusnya 200 kg/cm² (2,850 1b/in.²) dan bajanya memiliki tegangan leleh 2,600 kg/cm² (37,000 1b/in.²). Asumsi rasio bajanya 1 %, hingga p = 0.01

Maka : $q_c = 0.01\frac{2{,}600}{200} = 0.13$

Nilai ini lebih kecil dari nilai keruntuhan seimbangnya yaitu 0.333, maka keruntuhan tarik primer akan terjadi dan tulangan baja tekan tidak diperlukan. Jika diambil b = d/2, nilai d dihitung dari persamaan (2.15) maka :

1,000,000 = 0.13 x 0.5 d² x 200 (1 – 0.7 x 0.13),

didapatkan nilai :

d = 44.1 cm, dibulatkan menjadi 45 cm kemudian diambil nilai b = 22 cm, maka dengan persamaan (2.14) di dapat luas tulangan bajanya :

$$1{,}000{,}000 = A_t \; x\, 2{,}600 \, x\, 45\left(1 - 0.75\frac{A_t \; x\, 2{,}600}{22\, x\, 45\, x\, 200}\right)$$

dari $A_t^2 - 102\, A_t + 873 = 0$

dihasilkan : A_t = 9,4 cm² (1.46 in²)

Luas tulangan baja , didapat dari penyelesaian persamaan kuadrat dengan iterasi yang cukup memakan waktu, oleh karena itu bisa juga dipakai bagan dan tabel yang telah dipersiapkan yang didasarkan pada aturan yang telah disetujui sesuai peraturan negara masing-masing.

2.12. Penulangan Tekan

Jika momen batas yang diperlukan lebih besar dari momen balok yang dapat ditahannya pada keadaan keruntuhan seimbang, kemudian tidak memungkinkan diperbesar dimensi penampang melintangnya, maka harus dipasang tulangan tekan, dan luasan tulangan tarik diperbesar, ini dimaksudkan untuk menahan momen lentur kelebihannya dari momen keruntuhan seimbang. Secara normal tulangan baja tekan mencapai tegangan leleh, σ_{scy}, dan momen batas dari balok menjadi :

$$M_u = \frac{1}{4} bd^2 \sigma_{cu} + A_{sc}\left(\sigma_{scy} - \frac{2}{3}\sigma_{cu}\right)\left(d - d_c\right) \qquad (2.21)$$

Dimana : A_{sc} = luas tulangan tekan

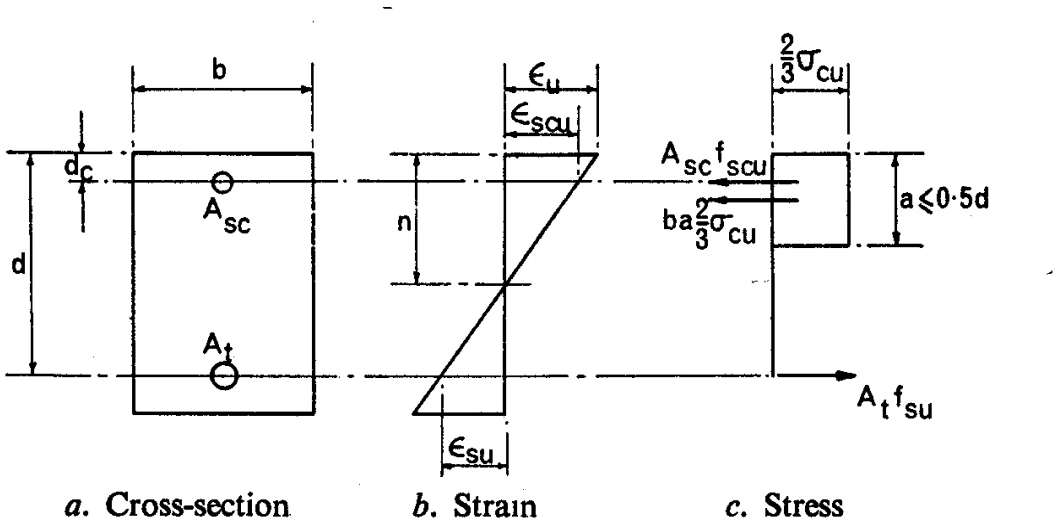
d_c = Jarak tinggi terhadap pusat tulangan tekan

Nilai 2/3 σ_{cu} dapat dikurangi dari tegangan leleh tulangan baja tekan sebagai pengganti luas beton yang ditempati oleh tulangannya, tetapi dalam prakteknya pengurangan ini biasanya diabaikan.

Luas tulangan tarik dapat dihitung dengan persamaan gaya-gaya resultan didalamnya, yaitu :

$$A_t \sigma_{sy} = b\ 0.5d \frac{2}{3}\sigma_{cu} + A_{sc}\left(\sigma_{scy} - \frac{2}{3}\sigma_{cu}\right) \qquad (2.22)$$

Gambar 2.6 menunjukan kondisi tegangan & regangan sebagai asumsi untuk disain pada saat keruntuhan balok dengan tulangan tekan.



Gambar 2.6. Asumsi keadaan keruntuhan balok beton bertulang dengan tulangan tekan

Dalam kasus tertentu, sebagai contoh dimana akibat pembebanan tiba-tiba, maka momen lenturnya dapat diberi cadangan, dengan memasang tulangan baja pada daerah atas balok, meskipun tidak perlu memperbesar momen batas diatas nilai keruntuhan seimbangnya, dalam hal ini tulangan tekan memberi kontribusi terhadap kapasitas momen batas dari balok, walaupun tulangan baja tersebut belum mencapai tegangan lelehnya sebelum keruntuhan balok terjadi. Oleh karena itu sangatlah penting untuk

menentukan tegangan dalam tulangan tekan dilihat dari distribusi regangannya saat keruntuhan.

Berdasarkan diagram regangan pada Gambar .2.6b, regangan tulangan tekan ε_{scu} didapat dengan : $\varepsilon_{scu} = \frac{n - d_c}{n}\varepsilon_u = \left(1 - \frac{d_c}{n}\right)\varepsilon_u$ (2.23)

Jika $\varepsilon_u = 0.00333$, maka tegangan tulangan tekannya adalah :

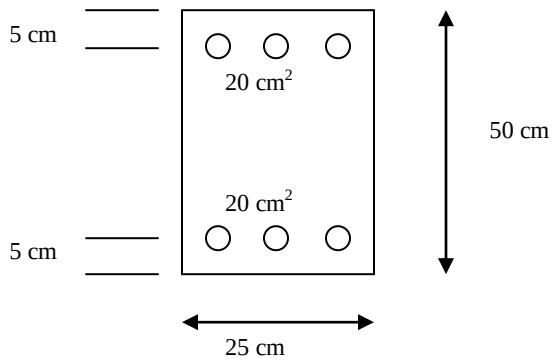
$$f_{scu} = 0.00333 \, x \, 2.1 \, x \, 10^6 \left(1 - \frac{d_c}{n}\right) \; kg/cm^2$$

$$= 7{,}000 \left(1 - \frac{d_c}{n}\right) \; kg/cm^2$$

$$= 100{,}000 \left(1 - \frac{d_c}{n}\right) \; lb/in.^2 \qquad (2.24)$$

misalkan modulus elastisitas baja = 2.1 x 10^6 kg/cm² (30 x $10^6$1b/in.²). tegangan leleh baja tariknya 2,800 kg/cm² (40,000 1b/in.²), karena kemungkinan akan terjadinya tekuk pada batang baja tersebut, maka tegangan leleh baja yang dipakai dalam tekanannya sekitar 2,500 kg/cm² (36,000 1b/in.²), dan jika nilai f_{scu} yang dipakai kurang dari σ_{scy} untuk baja, maka nilai f_{scu} harus dihitung untuk pemakaian perhitungan momen batas.

Sebagai contoh suatu balok bertulang dengan luas tulangan yang sama, baik tulangan tekan maupun tulangan tariknya seperti ditunjukan gambar penampang melintang pada Gambar 2. 7., Beton dengan umur 28 hari memiliki kekuatan kubus 250 kg/cm² (3,560 1b/in.²) dan tulangan bajanya memilki tegangan leleh tekan 2,500 kg/cm² (36,000 1b/in.²) dan tegangan leleh tariknya adalah 2,800 kg/cm² (40,000 1b/in.²).



Gambar 2.7. Balok dengan luasan baja atas dan bawah yang sama

Untuk menghitung jarak sumbu netral dari sisi atas harus dimisalkan terlebih dahulu bahwa tegangan tekan baja dibawah tegangan lelehnya atau pada tegangan leleh saat keruntuhan dari baloknya. Misalkan $f_{scu} < \sigma_{scy}$

$$f_{scu} = 7{,}000\left(1 - \frac{d_c}{n}\right) kg/cm^2 = 7{,}000\left(1 - \frac{5}{n}\right) kg/cm^2$$

Tetapi a = k_1 n = 0.85 n , jadi :

$$f_{scu} = 7{,}000\left(1 - \frac{5\,x\,0.85}{a}\right) kg/cm^2 = 7{,}000\left(1 - \frac{4.25}{a}\right) kg/cm^2$$

Persamaan gaya resultan di dalam :

$$20\ x\ 2{,}800 = 25\,a\,\frac{2}{3}250 + 20\left[7{,}000(1 - 4.25/a) - \frac{2}{3}250\right]$$

Saat leleh a = 5.55 cm

Dengan demikian $f_{scu} = 7{,}000(1 - 4{,}25/5.55) = 1{,}640\ kg/cm^2$, yang kurang dari 2,500 kg/cm², ini menyatakan bahwa pemisalan yang diambil adalah terbukti benar.

Kemudian momen batasnya :

$$M_u = 25\,x\,5.55\,x\,\frac{2}{3}\,x\,250\,(45 - 0.5\,x\,5.55) + 20(1{,}640 - \frac{2}{3}250)40$$

$$= 2{,}045{,}000\ kg.cm\ (1{,}770{,}000\ lb.in)$$

Berdasarkan persamaan (2.24), jika tegangan leleh tekan dari baja adalah 2,500 kg/cm² (36,000 lb/in.²), maka nilai rasio d_c/n sama dengan 0.64 pada saat baja mencapai tegangan lelehnya.

Jika $d_c/n > 0.64$, tegangan dalam tulangan baja tekannya adalah 7,000 (1- d_c/n) kg/cm², dan jika $d_c/n \leq 0.64$, tegangan tulangan baja mencapai tegangan leleh 2,500 kg/cm².

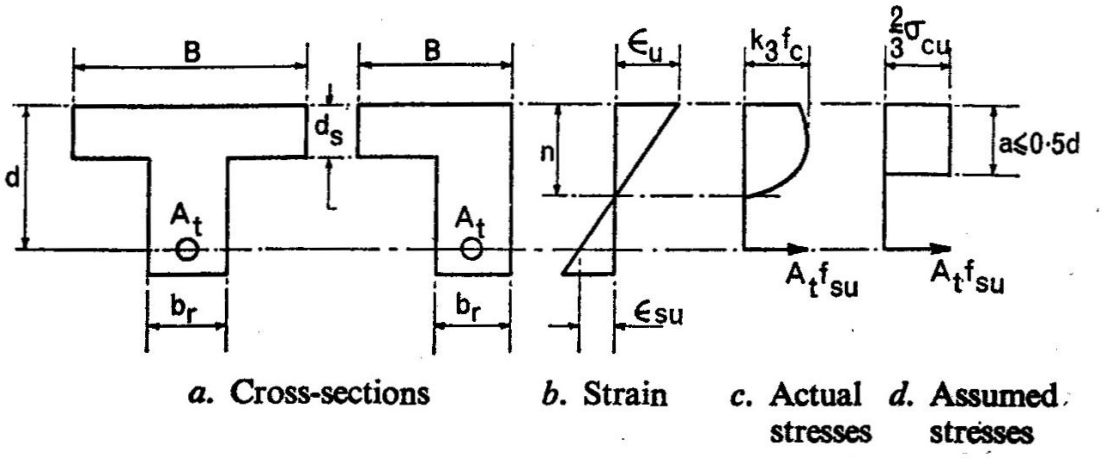
Kadang-kadang perbedaan antara tegangan leleh baja tulangan tarik dan tegangan leleh baja tulangan tekan dapat diabaikan. Untuk keadaan balok yang mencapai momen batas melebihi momen pada keruntuhan seimbangnya, maka tulangan tekan yang diperlukannya :

$$A_{sc} = \frac{M_u - \frac{1}{4} b d^2 \sigma_{cu}}{\sigma_{sy}(d - d_c)} \qquad (2.25)$$

dan luas tulangan tarik membutuhkan tambahan untuk mecapai keruntuhan seimbang sampai senilai A_{sc}.

2.13. Balok T dan L

Dalam balok bentuk T dan balok bentuk L yang tidak dapat melendut bebas akibat beban, maka keadaan saat keruntuhan dalam lentur ditunjukan dalam Gambar 2.8



Gambar 2.8. Kondisi saat keruntuhan pada balok T dan L

Ada dua keadaan yang dapat terjadi bila dipakai balok yang bersayap.

Jika luas tulangan baja yang menimbulkan blok tegangan dengan tinggi $k_1 n = a = A_t \sigma_{sy} / B\frac{2}{3}\sigma_{cu}$, ternyata lebih kecil dari ketebalan sayapnya d_s , maka blok tegangan dianggap sebagai blok persegi biasa dengan lebar B.

Sedangkan jika $A_t \sigma_{sy} / B\frac{2}{3}\sigma_{cu}$ lebih besar dari d_s, maka pendekatan berikut dapat dipakai.

Pada kondisi keruntuhan tarik primer maka persamaan gaya-gaya resultan dalamnya adalah :

$$A_t \sigma_{sy} = b_r\, a \frac{2}{3}\sigma_{cu} + (B - b_r) d_s \frac{2}{3}\sigma_{cu}$$

maka $$a = \frac{A_t \sigma_{sy} - (B - b_r) d_s \frac{2}{3}\sigma_{cu}}{b_r \frac{2}{3}\sigma_{cu}} \qquad (2.26)$$

Momen batas adalah :

$$M_u = b_r\, a \frac{2}{3} a_{cu} (d - 0.5a) + (B - b_r) d_s \frac{2}{3} a_{cu} (d - 0.5 d_s) \qquad (2.27)$$

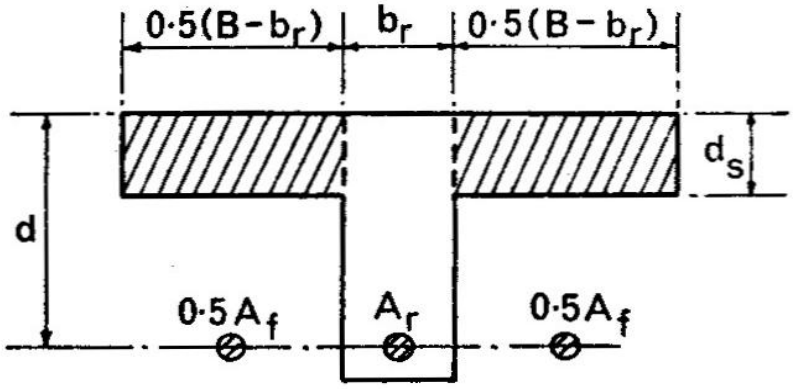
Jika pada kondisi lainnya, persoalannya adalah menghitung luas tulangan baja yang diperlukan dengan ukuran balok yang ditetapkan untuk menahan momen batas tertentu, kemudian yang dapat memenuhi pada dua bagian, satu pada bagian sayap yang mengalami tekan dan lainnya pada bagian badan yang tertekan (sepeti diperlihatkan Gambar .2.9), yaitu :

$A_t = A_f + A_r$

Dimana :

A_f = Luas tulangan pada daerah tekan dari sayap

A_r = Luas tulangan pada daerah tekan di bagian badan



Gambar. 2.9. Luasan baja terhadap tekan yang seimbang di sayapnya.

Dari persamaan gaya resultannya :

$$A_f \sigma_{sy} = (B - b_r) d_s \frac{2}{3} \sigma_{cu} \qquad (2.28)$$

Maka didapatkan nilai A_f.

Dengan demikian momen batasnya :

$$M_u = A_f \sigma_{sy} (d - 0.5 d_s) + A_r \sigma_{sy} d \left(1 - 0.75 \frac{A_r \sigma_{sy}}{b_r d \sigma_{cu}} \right) \qquad (2.29)$$

Menghasilkan A_r dalam persamaan kuadrat.

Secara teoritis hal ini mungkin terjadi, tidak begitu dengan prakteknya, untuk luas tulangan lebih besar dari tinggi blok tegangannya, a lebih besar dari 0.5 d . Pada keadaan ini diasumsikan bahwa a = 0.5d, dan keruntuhan tekan akan terjadi pada momen batas :

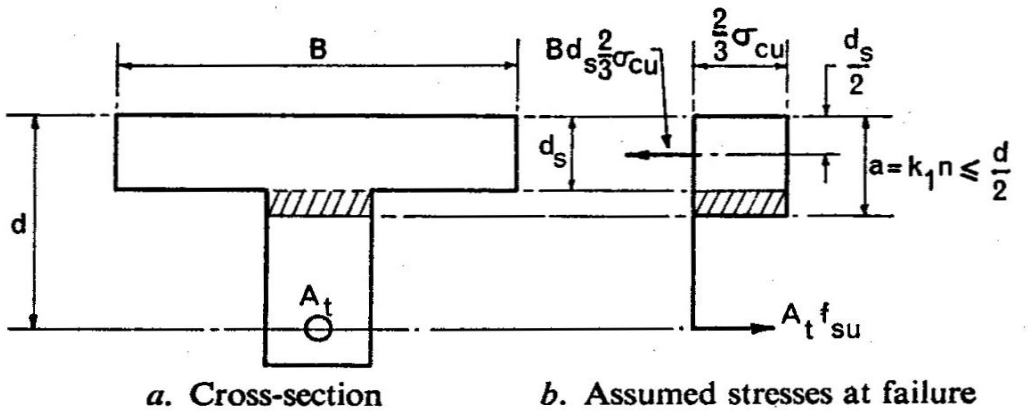
$$M_u = \frac{1}{4} b_r d^2 \sigma_{cu} + (B - b_r) d_s \frac{2}{3} \sigma_{cu} (d - 0.5 d_s) \qquad (2.30)$$

Suatu penyederhanaan sering dilakukan, yang tidak menyebabkan kesalahan yang serius, yaitu menghilangkan gaya tekan pada bagian badan yang ditunjukan dengan daerah arsir pada Gambar. 2.10a.

Dengan pendekatan ini maka momen batas untuk tarik primer dan tekan primer diberikan masing-masing dengan pesamaan (2.31) dan (2.32) sebagai berikut :

$$M_u = A_t \sigma_{sy} (d - 0.5 d_s) \qquad (2.31)$$

$$M_u = B d_s \tfrac{2}{3} \sigma_{cu} (d - 0.5 d_s) \qquad (2.32)$$



Gambar. 2.10. Metode pendekatan untuk balok T, dsb.

2.14 Prinsip dasar yang telah dijelaskan dan digambarkan dalam bab ini dapat diaplikasikan terhadap berbagai bentuk penampang beton bertulang lainnya. Referensi [7] merupakan contoh penggunaan blok tegangan berbentuk persegi sebagai asumsi beberapa bentuk penampang yang umumnya diperhitungkan, termasuk balok L, balok-balok dengan daerah tekan segitiga, dsb.

2.15 Ketentuan Peraturan

Peraturan mengarahkan para perancang dalam mempersiapkan disainnya yang memenuhi ketentuan pada tingkat tertentu dengan baik. Perancang harus yakin bahwa pekerjaannya tidak beresiko tinggi. Beberapa peraturan yang sekarang dipergunakan untuk suatu disain kekuatan batas dalam lentur umumnya menggunakan dua cara untuk aplikasi teori whitney sebagaimana dibicarakan dalam bab ini. Pertama, mereka menyarankan bahwa beton menjadi bagian materi yang lebih banyak dibandingkan dengan tulangan bajanya, dan kemudian batasan bagi betonnya saat keruntuhan memiliki nilai rata-rata kurang dari 2/3 kuat beton kubus, atau dapat ditetapkan bahwa momen batas sebagaimana ditentukan dalam teori whitney dikalikan dengan suatu factor yang kurang dari satu. Kedua, kondisi keruntuhan tekan primer, yang kejadiannya tanpa gejala peringatan terlebih dahulu haruslah dihindarkan dan untuk menghindarkannya disain seperti cara tersebut, dapat dilakukan dengan menentukan jarak tinggi blok tegangan semaksimum mungkin, atau dengan membatasi prosentase tulangan yang menghasilkan keruntuhan seimbang.

Peraturan standar India (I .S. 456 : 1964) yang dipakai untuk beton bertulang menetapkan bahwa tegangan uniform dalam beton pada kondisi keruntuhan diambil sama dengan 0.55 kali kuat kubus, dan jarak tinggi blok tegangan dibatasi sampai 0.43 ketinggian efektifnya.

Regangan batas dalam beton diasumsikan sama dengan 0.003. Dengan memakai nilai-nilai tersebut maka momen batas dapat dipakai dari persamaan (2.14) dan (2.17) sebagai berikut :

Untuk keruntuhan tekan primer :

$$M_u = A_t \sigma_{sy} d \left(1 - 0.91 \frac{A_t}{bd} \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}} \right) \qquad (2.33)$$

Untuk kerutuhan seimbang :

$$M_u = 0.815\, bd^2 \sigma_{cu} \qquad (2.34)$$

$$q_u = \frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}} = 0.236 \qquad (2.35)$$

dan nilai ini tidak boleh dilampaui, selama penulangan tekan dipakai. Shirwaiker [6] memberikan tabel disain untuk $\sigma_{sy} = 2600\, kg/cm^2$.

I.S. 456 : 1964 juga menetapkan bahwa faktor beban (batas) yang dipakai dalam suatu disain adalah :

U = 1.5 x (beban mati) + 2.2 x (beban hidup) (2.36)

Peraturan standar Inggris yang dipakai (C.P. 114 : 1957), Struktur Gedung yang menggunakan beton bertulang, sebagaimana ditetapkan pada februari 1965, memakai asumsi teori Whitney seperti dijelaskan pada bagian 2.9, mengatakan bahwa untuk disain campuran, kuat beton kubus yang dipakai sebagai bahan perhitungan harus direduksi menjadi 2/3 kali kuat kubus sebenarnya. Hal ini memberikan tegangan beton merata saat keruntuhan adalah 0.444 σ_{cu}. Untuk campuran normal faktor yang dipakai 0.6, ini memberikan tegangan 0.4 σ_{cu}. Tinggi blok tegangan maksimumnya boleh diambil setengah tinggi efektifnya dan regangan batas dari kapasitas betonnya diambil 0.0033. Persamaan momen batasnya (untuk diasain campuran) adalah sebagai berikut :

Untuk keruntuhan tekan primer :

$$M_u = A_t \sigma_{sy} d\left(1 - 1.13\frac{A_t}{bd}\frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{cu}}\right) \qquad (2.37)$$

Untuk keruntuhan seimbang :

$$M_u = 0.167\, bd^2 \alpha_{cu} \qquad (2.38)$$

$$q_u = \frac{A_t}{bd}\frac{\alpha_{sy}}{\alpha_{cu}} = 0.222 \qquad (2.39)$$

Dan jika nilai ini dilampaui, diperlukan tulangan baja tekan. Peraturan ini menetapkan faktor bebannya 1.8 untuk seluruhnya sehingga :

U = 1.8 (beban mati + beban hidup)

Berdasarkan Peraturan Gedung Lembaga Beton Amerika (A. C. I. 318 : 1963) untuk beton bertulang terdapat sedikit perbedaan pendekatan. Teori whitney dengan blok tegangan persegi empat yang dipakai dan tegangan uniform dalam beton saat keruntuhan diambil sama dengan 0.9 x nilai whitney, faktor 0.9 merupakan faktor reduksi yang diperbolehkan sebagai pengaruh acak perbedaan kekuatan materialnya, pekerjaannya, pengawasannya, dsb. Momen batas untuk keruntuhan primernya adalah :

$$M_u = 0.9\left(A_t \alpha_{sy} d \left(1 - 0.59 \frac{A_t}{bd} \frac{\alpha_{sy}}{\alpha_{cu}} \right) \right) \qquad (2.40)$$

Tinggi blok tegangan maksimum tidak ditentukan, tetapi rasio tulangan baja Ai / bd dibatasi sampai 75 % dari rasio keruntuhan seimbang didasarkan pada asumsi bahwa regangan batas dalam beton adalah 0.003 dan modulus elastisitas bajanya adalah 2.04 x 10^6 kg/cm² (29 x 10^6 1b/in. ²). Untuk beton dengan kuat selinder yang kurang atau sama dengan 281 kg/cm² (4,000 1b/in. ²) rasio K1 diasumsikan berkurang 0.05 secara linier untuk setiap 1,000 1b/in. ² dari kuat beton selinder di atas 4,000 1b/in. ². Pada asumsi berikut, momen batas maksimum tanpa tulangan, diamana betonnya dibawah *fc* = 281 kg/cm² maka :

$$M_u = 0.259 bd^2 \ f_c \approx 0.2 bd^2 \alpha_{cu} \qquad (2.41)$$

Dan maksimum

$$q = \frac{A_t}{bd} \frac{\alpha_{sy}}{f_c} = 0.369 \qquad (2.42)$$

$$q_u = \frac{A_t}{bd} \frac{\alpha_{sy}}{\alpha_{cu}} = 0.288 \qquad (2.43)$$

Faktor beban ditetapkan sebagai berikut :

U =1.5 (beban mati) + 1.8 (beban hidup) (2.44)

Sebagai kesimpulan dari pengaruh aturan India, Inggris dan Amerika ditunjukan dalam Tabel .2.3 berikut :

Tabel 2.3

COMPARISON OF CODE REGULATIONS FOR BENDING

	I.S.456: 1964	B.S.C.P.114:1957 (as amended Feb,1965) (Designed mixes)	A.C.I.318: 63*
Ultimate strain in concrete	0.003	0.0033	0.003
Uniform stress in concreteat failure	0.55 σ_{cu}	0.444 σ_{cu}	0.43 d
Maximum ultimate moment without compression steel	0.185 $bd^2\sigma_{cu}$	0.167 $bd^2\sigma_{cu}$	0.2 $bd^2\sigma_{cu}$
Maximum $q_c = \frac{A_t}{bd}\frac{\alpha_{sy}}{\alpha_{cu}}$	0.236	0.222	0.288
Ultimate (factored) load, U (D = service dead load, L = service live load)	1.5 D + 2.2 L	1.8 (D + L)	1.5 D + 1.8 L

2.16 Untuk menggambarkan pengaruh perbedaan peraturan yang dipakai terhadap disain balok bertulangan tunggal dimana beban matinya 100,000 kgcm (87,000 lb in) dan beban hidupnya 400,000 kg (346,000 1b in.). Beton yang memiliki kuat beton kubus 350 kg/cm² (5,000 1b/in.²) dan tulangan bajanya memiliki tegangan leleh 2,800 kg/cm² (40,000 1b/in.²) menghasilkan :

Momen batas disainnya adalah :

Aturan India : 1.5 x 100,000 + 2.2 x 400,000 = 1,030,000 kgcm

Aturan Inggris : 1.8 (100,000 + 400,000) = 900,000 kgcm

Aturan Amerika : 1.5 x 100,000 + 1.8 x 400,000 = 870,000 kgcm

Dengan asumsi rasio tulangan p = A_t/bd = 0.01 dan b = 0.5d, kita dapatkan nilai d berikut yang menggunakan metoda dari bagian 2.11 (contoh 1) :

Aturan India : d = 43.0 cm

Aturan Inggris : d = 41.4 cm

Aturan Amerika : d = 41.8 cm

Jika ketiga balok yang dipakai memiliki penampang melintang yang sama, untuk menentukan kebutuhan luas tulangan baja yang diperlukan, dimana b = 20 cm (8 in.) dan d = 40 cm (16 in.) adalah sebagai berikut :

Aturan India : At = 10.1 cm^2 (1.57 in^2)

Aturan Inggris : At = 9.0 cm^2 (1.40 in^2)

Aturan Amerika : At = 9.2 cm^2 (1.43 in^2)

Jelaslah bahwa perbedaan kebutuhan tulangan baja adalah relatif banyak tergantung faktor beban yang dipakai dibanding terhadap aturan disain momen batas dari penampang melintangnya, dan pada kenyataannya terdapat sedikit perbedaan dalam tiga pendekatan tersebut.