

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Beton Bertulang

Beton kuat terhadap tekan, tetapi lemah terhadap tarik. Oleh karena itu, perlu tulangan untuk menahan gaya tarik untuk memikul beban-beban yang bekerja pada beton. (Nawy, Edward G, 2008)

##### 2.1.1 Jarak Tulangan dan Selimut Beton untuk Beton Bertulang

Sangatlah perlu untuk menjaga timbulnya rongga-rongga pada beton serta kepastian bahwa campuran beton basah dapat melewati tulangan baja tanpa terjadi pemisahan material. Kandungan agregat untuk beton struktural sering kali berisi agregat kasar berukuran 0,75 inchi (diameter 19 mm), maka diperlukan adanya jarak antar tulangan minimal dan selimut beton minimal yang diperbolehkan. Lagipula, untuk melindungi penulangan dari karat dan kehilangan kekuatannya dalam kasus kebakaran, maka beberapa peraturan mensyaratkan tebal selimut beton minimal yang diperlukan. Beberapa persyaratan utama pada peraturan ACI 318 adalah:

1. Jarak bersih antar tulangan paralel dalam satu acuan tidak boleh kurang dari  $d_b$  atau 1 inch (25,4 mm).
2. Jarak bersih antar tulangan memanjang tidak boleh kurang dari  $1,5 d_b$  atau 1,5 inch (38,1 mm)
3. Tebal selimut beton minimum untuk balok dan kolom yang dicor di tempat tidak boleh kurang dari 1,5 inch (38,1 mm) bila tidak berhubungan langsung dengan udara luar maupun tanah; persyaratan ini berlaku juga untuk sengkang, sengkang miring, dan spiral.

##### 2.1.2 Pengekangan Beton

Terdapat perbedaan pada mutu beton antara beton yang tidak diberikan pengekangan (*unconfined*) dan beton yang diberikan pengekangan (*confined*).

Pengekangan pada inti penampang kolom (*concrete core*) yang diakibatkan adanya sengkang berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan tekan beton pada daerah terkekang dalam menerima kuat tekan secara aksial.

Perbandingan jarak antar sengkang terhadap inti penampang kolom (*concrete core*) daerah terkekang merupakan salah satu variabel yang berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan kolom.

Efek dari pengekangan adalah untuk meningkatkan kekuatan dan tegangan ultimit pada beton. Dengan adanya kolom dengan pengekangan yang diakibatkan karena tulangan sengkang sangat berpengaruh sekali terhadap ketahanan struktur yang direncanakan, sehingga kolom tersebut memiliki kekuatan yang lebih besar dan pada penampang kolom lebih dapat menerima gaya aksial yang lebih besar.

Pada umumnya, pengekangan dapat menggunakan sengkang biasa ataupun tulangan berbentuk spiral. Pengekangan kolom dengan tulangan berbentuk spiral sangat rapat (kolom spiral) memiliki perilaku yang lebih duktail daripada pengekangan kolom dengan sengkang biasa ataupun pengekangan kolom dengan spiral kurang rapat (Winter dan Nilson, 1993).

### 2.1.3 Syarat Penulangan Sengkang Kolom

Berdasarkan SK SNI 03-2847-2002, persyaratan penulangan sengkang untuk kolom harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

1. Semua batang tulangan non-pratekan harus diikat dengan sengkang dan ikat lateral, paling sedikit ukuran  $\emptyset 10$  untuk tulangan longitudinal lebih kecil dari  $\emptyset 32$ , dan paling tidak  $\emptyset 13$  untuk tulangan  $\emptyset 36$ ,  $\emptyset 44$ ,  $\emptyset 56$ , dan *bundle* tulangan longitudinal. Sebagai alternatif, boleh juga digunakan kawat ulir atau jaringan kawat las dengan luas penampang ekuivalen.
2. Spesi vertikal sengkang dan sengkang ikat tidak boleh melebihi 16 kali diameter ukuran tulangan longitudinal, 48 kali diameter batang atau kawat sengkang dan kait ikat, atau ukuran terkecil dari komponen struktur tersebut.
3. Sengkang dan kait ikat harus diatur sedemikian hingga setiap sudut dan tulangan longitudinal yang berselang harus mempunyai dukungan lateral yang didapat dari sudut sebuah sengkang atau kait ikat yang sudut dalamnya tidak lebih dari  $135^\circ$ , dan tidak boleh ada batang tulangan yang jarak bersihnya lebih dari 150 mm pada setiap sisi sepanjang sengkang atau sengkang ikat terhadap batang tulangan yang didukung secara lateral. Jika tulangan longitudinal terletak di sekeliling perimeter suatu lingkaran, maka sengkang berbentuk lingkaran penuh dapat dipergunakan.
4. Sengkang dan sengkang ikat di atas pondasi atau lantai pada tiap tingkat harus diletakkan secara vertikal tidak lebih dari  $\frac{1}{2}$  jarak spasi sengkang dan sengkang ikat, sedangkan di

bawah tulangan horizontal terbawah dari panel atau drop panel yang berada di atas harus berjarak tidak lebih dari  $\frac{1}{2}$  jarak spasi sengkang.

5. Jika terdapat balok atau konsol pendek yang menyatu pada keempat sisi suatu kolom, sengkang dan kait ikat boleh dihentikan tidak lebih dari 75 mm di daerah tulangan terbawah dari balok atau konsol pendek yang paling kecil dimensi vertikalnya.

## 2.2 Kolom

Kolom adalah batang tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktural yang memikul beban dari balok. Kolom meneruskan beban-beban dari elevasi atau ke elevasi yang lebih bawah hingga akhirnya sampai ke tanah melalui fondasi (Edward G, Nawy, 1990)

SNI 03-2847-2002 memberikan definisi kolom adalah komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil melebihi tiga yang digunakan terutama untuk mendukung beban aksial tekan. Sedangkan komponen struktur tekan tegak yang mempunyai rasio tinggi bebas terhadap dimensi lateral terkecil rata-rata kurang dari tiga disebut dengan pedestal.

Sebagai bagian dari suatu kerangka bangunan dengan fungsi dan peran seperti tersebut, kolom menempati posisi penting dalam sistem struktur bangunan. Kegagalan kolom akan berakibat langsung pada runtuhnya komponen struktur lain yang berhubungan dengannya, atau bahkan merupakan batas runtuh total keseluruhan struktur bangunan. Pada umumnya keruntuhan atau kegagalan komponen tekan tidak diawali dengan tanda peringatan yang jelas dan bersifat mendadak. Oleh karena itu dalam merencanakan struktur kolom harus diperhitungkan secara cermat dengan memberikan cadangan kekuatan lebih tinggi daripada komponen struktur lainnya.

Pada kolom, banyaknya tulangan harus dikontrol agar kolom dapat berperilaku duktail. Apabila beban pada kolom bertambah, maka akan timbul retak-retak pada daerah yang bertepatan dengan lokasi-lokasi sengkang, saat dalam keadaan batas keruntuhan, selimut beton di luar sengkang akan terlepas. Jika beban terus bertambah akan terjadi keruntuhan dan tekuk lokasi tulangan memanjang pada panjang yang tak tertumpu oleh sengkang. Sehingga dapat dikatakan bahwa dalam keadaan batas keruntuhan, selimut beton akan terlepas lebih dahulu sebelum lekatan baja-beton hilang.

## 2.3 Parameter yang Mempengaruhi Perilaku Kolom

Beberapa hal sebagai parameter yang mempengaruhi kekuatan dan deformasi dari kolom adalah: rasio beban aksial, aspek rasio, rasio tulangan longitudinal, dan rasio tulangan melintang.

### 2.3.1 Rasio Beban Aksial ( $n$ )

Rasio beban aksial merupakan perbandingan antara beban aksial terhadap kapasitas beban dukung aksialnya  $A_g f'_c$  sebagai berikut:

$$n = \frac{P}{A_g f'_c} \quad (2-1)$$

dengan:

$n$  = rasio beban aksial

$P$  = beban aksial (N)

$A_g$  = luas bruto penampang kolom ( $\text{mm}^2$ )

$f'_c$  = kekuatan tekan beton (MPa)

Beban tekan aksial umumnya mengurangi kapasitas daktilitas kurvatur karena peningkatan kedalaman zona kompresi, yang dapat menyebabkan peningkatan kurva kelengkungan dan penurunan kelengkungan ultimit (Paulay & Priestley, 1992). Hasil penelitian yang dilakukan oleh (Sheikh dan Yeh, 1990) mencatat bahwa beban aksial tinggi mengurangi kekuatan dan daktilitas dari bagian terbatas beton sangat signifikan. Namun, peningkatan beban aksial meningkatkan kekuatan geser (Sezen dan Moehle, 2004). Patwardhan (2005) menganalisis data uji termasuk spesimen kolom Sezen (2002) dan mengamati bahwa peningkatan beban aksial meningkatkan geser retak kekuatan terlepas dari aspek rasio, kekuatan beton, dan ukuran kolom, sejak peningkatan beban aksial membuat kolom kaku, penundaan retak dan meningkatkan efek gesekan geser.

Pengaruh rasio beban aksial pada kegagalan beban aksial telah banyak diteliti di Pusat PEER (Lynn 2001; Sezen 2002; dan Elwood 2003). Hasil menunjukkan bahwa kecenderungan pada kegagalan aksial tergantung pada beban aksial pada kolom dan jumlah tulangan melintang. Moehle (2005) mengamati bahwa membangun kegagalan hasil dari hilangnya beban aksial daya dukung pada kolom (kegagalan aksial) bukan dari pengurangan kekuatan lateral (kegagalan lateral). Akibatnya simpangan pada beban aksial biasanya lebih

besar dari simpangan terkait dengan kegagalan beban lateral untuk kolom dengan beban aksial yang rendah. Sebaliknya, kolom mengalami beban aksial lebih tinggi cenderung mengalami kegagalan beban aksial dengan cara yang lebih rapuh mendekati pada kegagalan simpangan beban lateral.

### 2.3.2 Aspek Rasio ( $\alpha$ )

Aspek rasio ( $\alpha$ ) merupakan perbandingan panjang kolom dengan tinggi penampang kolom seperti yang diberikan oleh:

$$\alpha = \frac{L}{D} \quad (2-2)$$

dengan:

L = panjang bentang geser kolom

D = tinggi penampang kolom

Panjang bentang geser dapat didefinisikan sebagai tinggi kolom untuk kolom dengan kelengkungan tunggal seperti kolom kantilever, atau dapat dinyatakan sebagai panjang kolom yang diukur dari titik *contra flexure* ke bagian kritis untuk kolom kelengkungan ganda.

Aspek rasio dapat digunakan sebagai indikator untuk perilaku runtuhnya perkuatan kolom beton akibat beban lateral. Jika aspek rasio meningkat, keuletan meningkat dan perilaku kegagalan berganti dari mode geser (untuk kolom dengan L/D rasio kurang dari 2) ke mode lentur (untuk L/D ratio lebih besar dari 4).

### 2.3.3 Rasio Tulangan Longitudinal ( $\rho_v$ )

Rasio tulangan longitudinal ( $\rho_v$ ) merupakan perbandingan dari luas total tulangan longitudinal dengan luas efektif pada beton. Ditunjukkan sebagai berikut:

$$\rho_v = \frac{A_s}{b D} \quad (2-3)$$

dengan:

$A_s$  = luas total tulangan longitudinal ( $\text{mm}^2$ )

b = lebar kolom (mm)

D = tinggi penampang kolom (mm)

Nama lain dari tulangan longitudinal (tulangan memanjang) adalah tulangan lentur, karena fungsi yang paling utama dari tulangan longitudinal adalah untuk menahan lentur. Oleh karena itu, jumlah dan luas tulangan longitudinal pada suatu struktur dapat berpengaruh terhadap kekuatan struktur tersebut dalam menahan lentur. Di sisi lain, kegagalan menahan beban lateral tergantung pada kekuatan lentur suatu struktur.

### 2.3.4 Presentase Tulangan Transversal ( $\rho_s$ )

Tulangan transversal (sengkang) adalah tulangan yang memiliki fungsi utama untuk menahan geser, karena fungsi tersebut tak jarang tulangan transversal disebut sebagai tulangan geser. Rasio tulangan transversal adalah suatu perbandingan khusus yang memiliki banyak definisi tentang tulangan transversal. Berikut ini adalah dua jenis rasio tulangan transversal yang sering digunakan pada penelitian-penelitian :

#### A. Rasio Volumetrik

Merupakan rasio antara volume tulangan sengkang dengan volume inti beton yang diukur hingga di bagian luar sengkang. Peneliti yang menggunakan rasio volumetrik adalah Park dan Paulay (1975)

$$\rho_s = \frac{A_v(2b_s + 2h_s)}{b_h h_h s} \quad (2-4)$$

dengan:

$A_v$  = luas penampang tulangan transversal ( $\text{mm}^2$ )

$b_s$  dan  $h_s$  = dimensi terhadap garis tengah sengkang (mm)

$b_h$  dan  $h_h$  = dimensi inti beton diukur ke bagian luar sengkang (mm)

#### B. Rasio Luas

Merupakan rasio antara luas penampang tulangan transversal dengan luas penampang beton yang tegak lurus dengan arah beban lateral

$$A_{v.min} = \frac{0.35 b_v s}{f_{sy}} \quad (2-5)$$

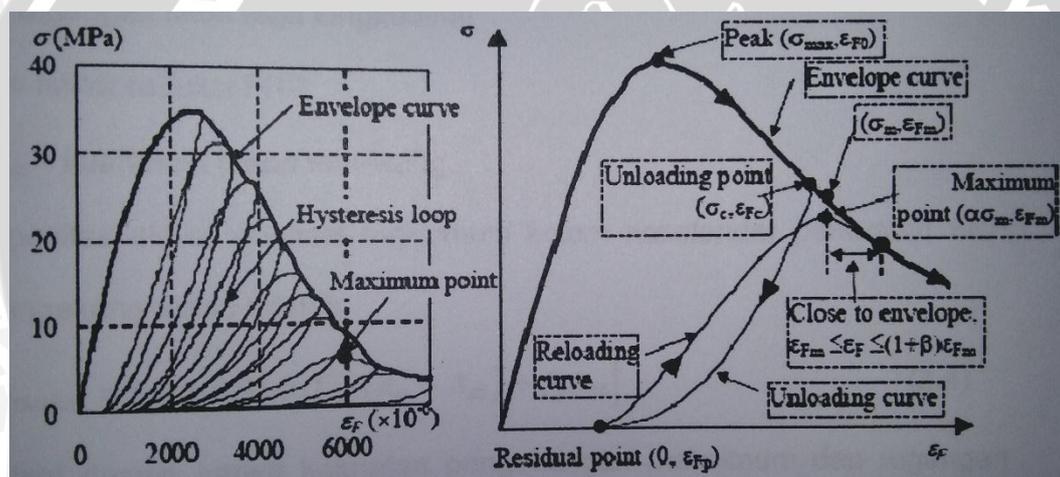
dengan:

$b_v$  = lebar efektif pada web untuk geser ( $b_w - \Sigma d_d$ ) (mm)

## 2.4 Beban Siklik

Beban siklik merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Kegagalan struktur juga bisa disebabkan oleh beban siklik yang terjadi, meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Kegagalan *fatigue* yang merupakan fenomena dimana beton pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum dan kekuatan *fatigue* yang didefinisikan sebagai kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. Kekuatan *fatigue* dipengaruhi oleh berbagai pembebanan, tingkat pembebanan, *load history*, dan sifat material. (Al-Sulayfani & Al-Tae, 2008)

Pada struktur kolom, beban aksial merupakan representatif dari berat sendiri dan beban siklik merupakan beban luar yang terjadi berulang, misalkan beban gempa. Beban aksial dan siklik ini akan bekerja secara bersamaan pada struktur kolom.



Gambar 2.1 *Hysteresis Loop*

Untuk memprediksi perilaku struktur beton dibawah pembebanan seismik, model tegangan-tegangan beton dibawah beban siklik (*hysteresis loop*) adalah hal yang penting untuk diamati. (Watanabe at. All) Selain itu, tingkat pembebanan dan jumlah siklus sangat mempengaruhi respon tegangan-regangan beton. Seperti dinyatakan dalam model Mander dkk. (1988) untuk beton terkekang. (Saadatmanesh at. All, 1994)

Dari gambar 2.1 dapat dilihat bahwa : *unloading point* adalah titik dimana *unloading* dimulai, *residual point* adalah titik ketika *unloading* penuh (tegangan mencapai nol), dan *maximum point* adalah persimpangan *unloading point* dengan *unloading curve*. (Al-Sulayfani & Al-Tae, 2008) Unloading curve ( $\sigma, \epsilon_{Fu}$ ) adalah jika nilai  $\epsilon_F$  di wilayah pasca-puncak

berkurang dengan tegangan ( $\sigma$ ) : antara *unloading point* ( $\sigma_c, \epsilon_{Fc}$ ) dan *residual point* ( $0, \epsilon_{Fp}$ ) (tegangan mencapai 0 kN). Setelah benar-benar *unloading* diturunkan sampai nol, tegangan dan regangan meningkat lagi dari *residual point*. Kemudian, pendekatan ke *maximum point* ( $\alpha\sigma_m, \epsilon_{Fm}$ ) yang disebut *reloading curve* ( $\sigma - \epsilon_{Fr}$ ). Titik akhir dari *reloading curve* dan titik awal *unloading curve* disebut *envelope curve*. (Watanabe at. All)

## 2.5 Kapasitas Kolom

### A. Sebagai Kolom Pendek

Jika pengaruh kelangsingan kolom dapat diabaikan maka kapasitas kolom juga dibatasi, yakni kuat aksial nominal maksimum  $P_{n(max)}$  tidak boleh melebihi  $0,8 P_o$  untuk kolom dengan pengikat sengkang, dan  $0,85 P_o$  untuk kolom dengan pengikat spiral. Kapasitas kolom terhadap beban aksial sentris  $P_n$  max untuk penulangan sengkang adalah:

$$\phi P_{n(max)} = 0,80\phi \{0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + (A_{st} f_y)\} \quad (2-6)$$

dengan:

$f'_c$  = kekuatan tekan beton (Mpa)

$A_g$  = luas bruto penampang kolom ( $mm^2$ )

$A_{st}$  = luas total tulangan longitudinal ( $mm^2$ )

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

### B. Kolom dengan Beban Aksial dan Lentur

Tulangan tekan pada kolom beton yang dibebani eksentris pada tingkat beban ultimit umumnya akan mencapai tegangan leleh sehingga diasumsikan bahwa baja tulangan tekan sudah leleh, kemudian baru regangannya diperiksa apakah memenuhi ketentuan ini:

$$P_n = 0,85f'_c ab + f_y A_{st} - f_s A_{st} \quad (2-7)$$

dengan:

$f'_c$  = kekuatan tekan beton (Mpa)

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

$f_s$  = tegangan tulangan longitudinal (Mpa)

$A_{st}$  = luas total tulangan longitudinal ( $mm^2$ )

Dengan mengambil momen terhadap tulangan tarik dapat diperoleh persamaan:

$$M_n = P_n \cdot e = 0,85 f'_c ab (h/2 - 1/2 a) + A_s' f_y (d - d') \quad (2-8)$$

dengan:

$f'_c$  = kekuatan tekan beton (Mpa)

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

$A_s'$  = luas tulangan longitudinal tekan ( $\text{mm}^2$ )

$a$  = kedalaman blok tegangan tekan (mm)

### C. Kondisi Seimbang (*Balance Failure*)

$$a_b = \beta_1 C_b = \frac{0,003}{0,003 E_s + f_y} \beta_1 d, \text{ dengan } f_s = f_y \quad (2-9)$$

dengan:

$\beta_1$  = (nilai koefisien = 0,85)

$C_b$  = letak garis netral saat balanced (mm)

$E_s$  = modulus elastisitas baja (Mpa)

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

Substitusikan nilai  $a_b$  dan  $f_s$  kedalam persamaan maka akan memperoleh beban aksial dan momen lentur untuk kondisi seimbang, sebagai berikut:

$$P_{nb} = P_n = 0,85 f'_c a_b b + f_y A_{st} - f_s A_{st} \quad (2-10)$$

maka,

$$M_{nb} = P_{nb} \cdot e_b = 0,85 f'_c a_b b (h/2 - 1/2 a) + A_s' f_y (d - d') \quad (2-11)$$

dimana:

$P_{nb}$  = beban kuat nominal aksial balanced (N)

$e_b$  = eksentrisitas saat balanced (mm)

$A_s'$  = luas tulangan tekan ( $\text{mm}^2$ )

$a_b$  = tinggi balok tegangan (mm)

$f_y$  = tegangan leleh baja tulangan (Mpa)

$f'_c$  = kuat tekan beton (Mpa)

#### D. Keruntuhan Tarik

Ragam keruntuhan yang terjadi pada kolom mungkin saja bukan keruntuhan seimbang, mungkin saja kolom tersebut mengalami keruntuhan tarik atau keruntuhan tekan. Keruntuhan tarik terjadi jika  $P_u < P_b$  yang berarti  $\epsilon'_s > \epsilon_y$  atau  $e < e_b$ . Tegangan pada tulangan tarik sama dengan tegangan lelehnya. Bila tulangan diletakkan secara simetris ( $A_s = A_s'$ ), dan tulangan tekan telah meleleh, maka:

$$P_n = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad (2-11)$$

$$M_n = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \left( \frac{h}{2} - a/2 \right) + A_s \cdot f_y (d - d') \quad (2-12)$$

maka,

$$P_n \cdot e = P_n \left( \frac{h}{2} - a/2 \right) + A_s \cdot f_y (d - d') \quad (2-13)$$

$$a = \frac{P_n}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2-14)$$

maka,

$$P_n \cdot e = P_n \left( \frac{h}{2} - \frac{P_n}{1.7 f'_c b} \right) + A_s \cdot f_y (d - d') \quad (2-15)$$

dengan:

$f'_c$  = kuat tekan beton (Mpa)

$P_n$  = beban kuat nominal aksial (N)

$A_s$  = luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )

$f_y$  = tegangan leleh baja tulangan (Mpa)

$d$  = tinggi efektif (mm)

$d'$  = jarak dari muka tekan sampai titik berat tulangan tekan (mm)

#### E. Keruntuhan Tekan

Keruntuhan tekan terjadi  $P_u > P_b$  yang berarti  $\epsilon_s < \epsilon_y$  atau  $c > c_b$ . Tegangan pada tulangan tarik harus ditentukan.

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} \quad (2-16)$$

$$f_s = \epsilon_s E_s = 0,003 \frac{d - c}{c} E_s \quad (2-17)$$

dimana:

$\varepsilon_s$  = regangan baja

$f_s$  = tegangan tulangan longitudinal (Mpa)

$E_s$  = modulus Elastisitas Baja (Mpa)

Karena persamaan diatas diasumsikan baja tulangan tekan sudah leleh, maka harus dikontrol dengan melihat regangan pada baja tulangan:

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} > \frac{f_y}{E_s} \quad (2-18)$$

dengan:

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

$E_s$  = modulus elastisitas baja (Mpa)

Jika baja tulangan tekan belum leleh, nilai harus ditentukan melalui diagram tegangannya:

$$f_s = \varepsilon_s' E_s = 0,003 \frac{c-d'}{c} E_s \quad (2-19)$$

dengan:

$\varepsilon_s'$  = regangan baja

$E_s$  = modulus elastisitas baja (Mpa)

Dalam kondisi ini, untuk menentukan besarnya kapasitas penampang kolom yang mengalami keruntuhan tekan dicoba menggunakan prosedur pendekatan dari Whitney, yaitu:

$$P_n = \frac{f'c b h}{\left(\frac{3he}{(d^2)}\right)+1,18} + \frac{A_s' f_y}{\left[\frac{e}{(d-d_i)}\right]+0,5} \quad (2-20)$$

dengan:

$f'c$  = kuat tekan beton (Mpa)

$A_s'$  = luas tulangan tekan ( $\text{mm}^2$ )

$f_y$  = tegangan leleh tulangan longitudinal (Mpa)

## 2.6 Momen Retak

Menurut Siddiq S. (1992), benda uji yang dibebani dengan beban kombinasi tekan N, beban lateral Q dan momen lentur QxH. Secara teoritis besarnya kapasitas kolom pada saat mengalami retak dapat dianalisis dari momen retak penampang benda uji tersebut. Besarnya momen retak dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_{\text{retak}} = \frac{f_r \cdot I_g}{Y_b} \quad (2-21)$$

dengan:

$f_r$  = modulus retak beton (Mpa)

$I_g$  = momen inersia bruto ( $\text{mm}^4$ )

$Y_b$  = jarak antara titik berat desak beton ke titik berat tarik beton (mm)

$$f_r = 0,7 \sqrt{f'c} \quad (2-22)$$

dengan:

$f'c$  = kuat tekan beton (Mpa)

$$I_{\text{beton}} = 1/12 bh^3 \quad (2-23)$$

dengan:

$h$  = tinggi penampang (mm)

$$Q_{\text{retak}} = M_{\text{retak}} / I_n \quad (2-24)$$

dengan:

$M_{\text{retak}}$  = Momen retak (Nmm)

$I_n$  = momen inersia penampang ( $\text{mm}^4$ )