II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil Penelitian Tentang Balok Berlubang

Perancangan suatu balok di atas perletakan sederhana dengan bukaan yang ditempatkan pada daerah yang dibebani kombinasi lentur dan geser telah dilakukan para peneliti (Lorensten, 1962; Nasser et al., 1967; Ragan & Wawuruk, 1967; Douglas & Gambrell, 1974; dan Barney et al., 1977). Penelitian tersebut dilakukan terhadap beban terpusat dan bukaan ditempatkan pada bagian balok yang tidak terkena beban secara langsung sehingga bukaan terbebas dari beban luar.

Namun permasalahan yang ada adalah mengenai distribusi atau pembagiaan total gaya geser yang dipikul oleh kedua *chord* atas dan bawah. Beberapa peneliti (Nasser et al., 1967; Ragan & Wawaruk, 1967) mengusulkan bahwa jumlah gaya geser yang dipikul oleh masing-masing elemen *chord* dapat didistribusikan sesuai luas penampangnya. Sedangkan peneliti lainnya (Barney et al., 1977) berpendapat bahwa distribusi gaya gesernya sesuai dengan kekakuan lenturnya dan Mansur et al. (1984) mengusulkan bahwa jumlah gaya geser yang dipikul oleh setiap *chord* tidak hanya tergantung sifat-sifat penampangnya, tetapi juga tergantung pada ukuran dan lokasi bukaan.

Lisantono dan Wigroho (2005) telah melakukan penelitian untuk mengetahui kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang dengan bukaan ganda pada badan balok dengan tinjauan terhadap variasi lokasi bukaan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa balok dengan bukaan yang ditempatkan di daerah lentur rendah – geser tinggi tidak menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan dengan balok tanpa bukaan. Sedangkan balok dengan bukaan yang ditempatkan di daerah lentur tinggi – geser tinggi menunjukkan adanya penurunan kakakuan yang cukup signifikan setelah terjadi retak pertama. Fenomena tersebut juga menunjukkan bahwa balok dengan bukaan yang ditempatkan pada daerah lentur rendah – geser tinggi mempunyai kekakuan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan balok dengan bukaan yang ditempatkan pada daerah lentur tinggi – geser tinggi. Hasil penelitian mereka juga menunjukkan bahwa balok dengan bukaan yang ditempatkan di daerah lentur tinggi – geser tinggi secara umum menunjukkan kecenderungan adanya penurunan kapasitas beban apabila dibandingkan dengan balok dengan bukaan yang ditempatkan di daerah lentur rendah – geser tinggi.

Lisantono dan Wigroho (2007) juga telah melakukan penelitian untuk mengetahui kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang dengan bukaan ganda pada badan balok dengan tinjauan terhadap variasi dimensi bukaan. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa kurva beban-defleksi balok dengan bukaan paling pendek (BOD1) menunjukkan penurunan kapasitas beban sebesar 6,25 % apabila dibanding dengan balok utuh (BSD). Sedangkan balok dengan bukaan yang lebih lebar (BOD2) memberikan peningkatan kapasitas beban sebesar 6,67 % terhadap balok dengan bukaan paling pendek

(BOD1) dan balok dengan bukaan paling lebar (BOD3) memberikan peningkatan kapasitas beban sebesar 6,25 % dibandingkan dengan balok dengan bukaan yang lebih pendek (BOD2).

Fenomena yang memperlihatkan bahwa kapasitas balok BOD3 yang lebih besar dari balok BOD2 dan kapasitas balok BOD2 yang lebih besar dari balok BOD1 disebabkan oleh tambahan tulangan masing-masing 2 D 13 mm di atas dan bawah bukaan pada balok BOD3 lebih panjang apabila dibanding dengan tulangan yang sama pada balok BOD2, demikian juga tambahan tulangan pada balok BOD2 lebih panjang apabila dibanding dengan tulangan yang sama pada balok BOD1.

B. Beton

Beton adalah suatu campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat kasar, agregat halus dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan yang membentuk masa padat. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat satuan 2200 - 2500 kg/m^3 menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah yang tidak menggunakan bahan tambahan (SK SNI 03-2847-2002).

Untuk menghasilkan benda beton dengan mutu yang baik perlu dilakukan pengujian sifat mekanik pada sampel beton. Sifat mekanik beton tersebut antara lain :

1. Kuat Tekan Beton

Beton memiliki sifat utama yaitu kuat terhadap beban tekan, maka untuk mengetahui mutu beton, pada umumnya ditinjau terhadap kuat tekan beton tersebut. Mutu beton dibedakan dalam 3 (tiga) hal yaitu :

1. Beton dengan f'_c kurang dari 10 MPa, digunakan untuk beton non struktur.
2. Beton dengan f'_c lebih dari sama dengan 10 MPa dan kurang dari 20 MPa, biasanya digunakan untuk beton struktur.
3. Khusus untuk struktur bangunan tahan gempa dipakai mutu beton dengan f'_c lebih dari 20 MPa.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton yaitu : faktor air semen, faktor-faktor sifat agregat, jenis semen, umur beton dan perbandingan campuran beton.

Pengolahan beton merupakan faktor yang perlu diperhatikan, agar mutu beton tersebut sesuai yang disyaratkan. Pengolahan beton ini meliputi : pengadukan beton, pengangkutan beton, penuangan beton, pemadatan, perataan dan perawatan beton. Kuat tekan beton akan menurun apabila terjadi kerusakan pada beton.

Untuk mengetahui kuat tekan beton dapat dilakukan uji tekan beton berdasarkan ASTM (*American Society for Testing Materials*) C-192. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan/mutu beton yang disesuaikan dengan kuat tekan rencana. Pengujian kuat tekan beton ini

dilakukan dengan menggunakan alat *CTM* (*Compression Testing Machine*). Kuat tekan beton dapat dicari dengan rumus :

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad \text{.....} \quad (1)$$

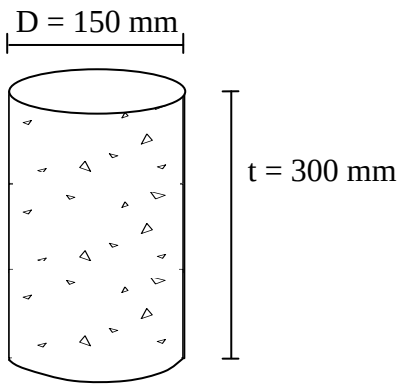
Keterangan :

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

P = beban tekan maksimum (N)

A = luas penampang tertekan (mm^2)

Sampel benda uji berbentuk silinder dan dapat dilihat pada gambar berikut :



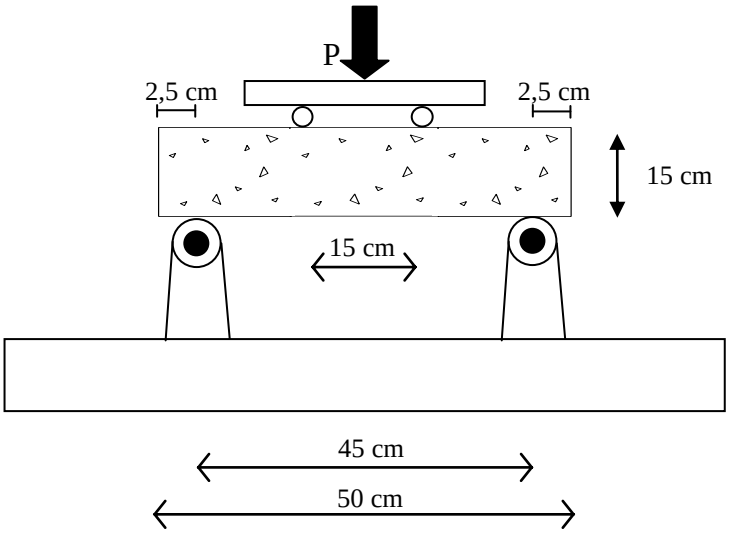
Gambar 1. Bentuk dan ukuran benda uji silinder

2. Kuat Tarik lentur Beton

Pada beton yang akan digunakan sebagai elemen struktur berupa balok maka perlu diketahui nilai kuat lentur bahan beton tersebut hal ini diasumsikan sebagai berikut : Apabila suatu gelagar balok bentang sederhana menahan beban yang mengakibatkan timbulnya momen lentur, akan terjadi deformasi (regangan) lentur di dalam balok tersebut. Pada kejadian momen lentur positif, regangan tekan terjadi di bagian atas dan

regangan tarik di bagian bawah dari penampang. Regangan-regangan tersebut mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan yang harus ditahan oleh balok, tegangan tekan di atas dan tegangan tarik di bagian bawah (Istimawan D., 1999).

Nilai kuat tarik lentur beton didapat melalui tata-cara pengujian standar *ASTM C-78.* Pengujian kuat tarik lentur beton ini dilakukan dengan menggunakan alat *Loading Frame* dibantu dengan *Hidraulic Jack* sebagai alat pemberi beban dan *Proving Ring* sebagai alat pengukur besarnya beban. Pengujian kuat tarik lentur dilakukan terhadap balok di atas dua perletakan dan dibebani dengan dua beban terpusat yang simetris seperti pada gambar berikut :



Gambar 2. Pengujian kuat tarik lentur balok beton

Pada serat bawah antara dua titik pembebanan akan terjadi kuat tarik maksimum yang merata. Benda uji yang digunakan adalah balok dengan lebar 150 mm, tinggi 150 mm dan panjang 500 mm dan dibebani dengan kecepatan

pembebanan antara 0,0143 MPa/detik sampai 0,02 MPa/detik. Tegangan tarik yang timbul dapat diperhitungkan sebagai berikut :

$$f_{ct} = \frac{M.c}{I} \quad \text{.....} \quad (2)$$

SNI 2002 menyatakan bahwa besarnya kuat tarik lentur beton adalah :

$$f_{ct} = 0,7 \times \sqrt{f'_c} \quad \text{.....} \quad (3)$$

Keterangan :

f_{ct} = Tegangan lentur (N/mm^2)

M = Momen yang bekerja pada balok (N mm)

c = Jarak serat terluar terhadap garis netral, baik di daerah tekan maupun tarik (mm)

I = Momen inersia penampang balok terhadap garis netral (mm^4)

f'_c = Kuat tekan beton (N/mm^2)

C. Beton Bertulang

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SK SNI 03-2847-2002).

Nilai kuat tekan beton relatif tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan bersifat getas. Nilai dari kuat tariknya hanya berkisar 9% - 15% saja dari kuat tekannya. (Dipohusodo, 1999).

Penggunaan beton sebagai komponen struktur bangunan, umumnya beton diperkuat dengan batang tulangan baja sebagai bahan yang dapat bekerja sama

dan membantu kelemahannya, terutama pada bagian yang menahan gaya tarik. Dengan demikian tersusun pembagian tugas, dimana batang tulangan baja bertugas memperkuat dan menahan gaya tarik, sedangkan beton hanya diperhitungkan untuk menahan gaya tekan. Komponen struktur beton dengan kerja sama seperti itu disebut sebagai beton bertulangan baja atau lazim disebut beton bertulang saja (Dipohusodo, 1999).

Kerjasama antara bahan beton dan baja tulangan hanya dapat terwujud dengan didasarkan pada keadaan-keadaan; (1) lekatan sempurna antara batang tulangan baja dengan beton keras yang membungkusnya sehingga tidak terjadi penggelinciran antara keduanya; (2) beton yang mengelilingi batang tulangan baja bersifat kedap sehingga mampu melindungi dan mencegah terjadinya karat baja; (3) angka muai kedua bahan hampir sama, dimana untuk setiap kenaikan suhu satu derajat celcius angka muai beton 0.000010 sampai 0.000013 sedangkan angka muai baja 0.000012, sehingga tegangan yang timbul karena perbedaan nilai dapat diabaikan (Dipohusodo, 1999).

D. Perilaku Balok Beton Akibat Geser

Semua elemen struktur, baik struktur beton maupun baja, tidak terlepas dari masalah gaya geser. Gaya geser umumnya tidak bekerja sendirian, tetapi berkombinasi dengan lentur, torsi atau gaya normal. Oleh karena itu pemahaman setiap interaksi antara gaya geser dengan gaya-gaya lainnya sangat penting, terutama yang berkaitan dengan kekuatan elemen beton bertulang (Wahyudi & Rahim, 1999).

Untuk komponen struktur beton bertulang, apabila gaya geser yang bekerja sedemikian besar hingga diluar kemampuan beton untuk menahannya, perlu memasang baja tulangan tambahan untuk menahan geser tersebut (Dipohusodo, 1999).

Percobaan-percobaan yang telah dipublikasikan menunjukkan bahwa sifat keruntuhan akibat gaya geser pada suatu elemen struktur beton bertulang adalah getas (*brittle*), tidak daktail dan keruntuhannya terjadi secara tiba-tiba tanpa ada peringatan. Hal tersebut disebabkan kekuatan geser struktur beton bertulang terutama tergantung pada kekuatan tarik dan tekan beton. Keadaan ini sangat berbeda dengan tujuan perencanaan yang selalu menginginkan suatu struktur yang daktail. Sehingga, meskipun prediksi keruntuhan geser cukup sulit, seorang perencana harus berupaya agar jenis keruntuhan geser tidak terjadi (Wahyudi & Rahim, 1999).

E. Balok Beton Bertulangan Tunggal

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja (SNI 03-2874-2002).

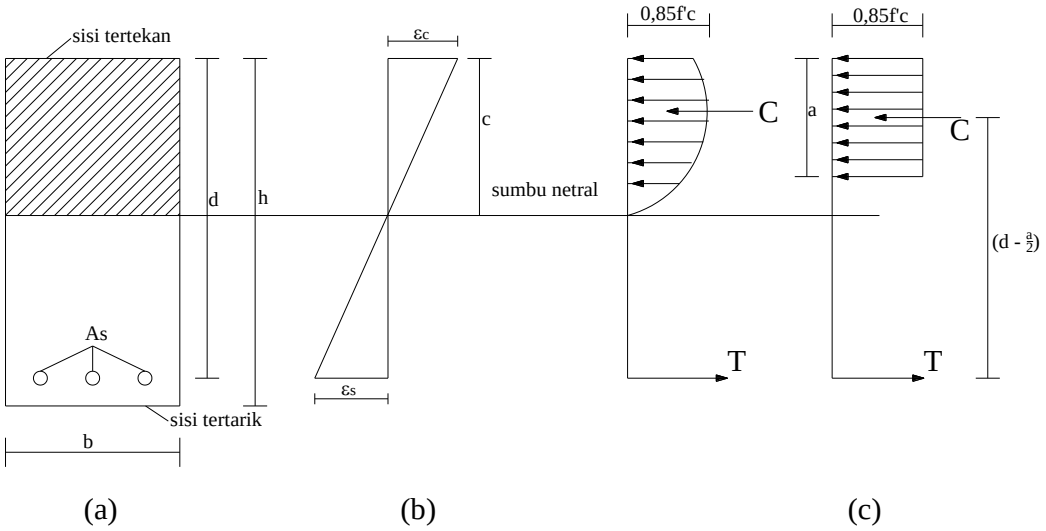
Beton mempunyai kekuatan tarik yang sangat kecil, untuk menambah kemampuan dan kapasitas dukung struktur balok beton diperlukan batang tulangan baja pada daerah dimana tegangan tarik bekerja. Pada prakteknya

penulangan beton tidak hanya dipasang pada daerah tegangan tarik (sistem penulangan tunggal) saja.

Sistem tulangan tunggal hampir tidak pernah dimanfaatkan untuk balok, karena pemasangan tulangan tambahan di daerah tekan. Misalnya: Pada bagian tepi atas penampang tengah lapangan, akan mempermudah pengaitan sengkang (*stirrup*). Secara struktur, tulangan tekan ini diperlukan antara lain untuk:

1. Meningkatkan momen ketahanan penampang karena dimensi penampang yang terbatas.
2. Meningkatkan kapasitas rotasi penampang yang berkaitan dengan peningkatan daktilitas penampang.
3. Meningkatkan kekakuan penampang, karena dapat mengurangi defleksi struktur.
4. Dapat mencakup kemungkinan adanya momen yang berubah tanda. Gaya luar yang bekerja pada suatu struktur tidaklah selalu tetap; sehingga, gaya tersebut dapat menyebabkan momen-momen internal berubah tanda (Wahyudi & Rahim, 1999).

Perencanaan penulangan lentur didasarkan pada asumsi bahwa tulangan baja telah mencapai regangan leleh sebelum beton mencapai regangan maksimum 0,003.



Gambar 3. Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok : (a) penampang melintang; (b) regangan; (c) blok regangan ekuivalen yang diasumsikan.

Berdasarkan bentuk empat persegi panjang pada balok beton, intensitas tegangan beton rata-rata ditentukan sebesar 0,85 f'_c dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang balok selebar *b* dan sedalam *a*, yang mana besarnya ditentukan dengan rumus:

$$a = \beta_1 c \quad \text{.....} (4)$$

Jarak garis netral terhadap serat tepi tertekan pada kondisi berimbang:

$$c = d\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}\right) \quad \text{.....} (5)$$

Regangan baja tulangan tarik:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \left(\frac{d-c}{c}\right) \quad \text{.....} (6)$$

Syarat regangan baja tulangan tarik :

$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

Regangan leleh tulangan baja :

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_y}$$

Persamaan keseimbangan horizontal gaya internal:

$C = T$ ..... (7)

Daerah tekan beton :

$C = 0.85\ f_c'ab$ ..... (8)

Daerah tarik baja tulangan :

$T = A_s f_y$ ..... (9)

Rasio penulangan dapat dihitung dengan persamaan :

$$\rho_b = \frac{0{,}85\ x\ f'_c\ \beta_1}{f_y}\ x\ \frac{600}{600 + f_y} \quad \text{..... (10)}$$

$$\rho_{mak} = 0{,}75\ \rho_b$$

$$\rho_{min} = \frac{1{,}4}{f_y}$$

Syarat faktor β_1 :

Untuk $f'_c \leq 30$ Mpa

$\beta_1 = 0{,}85$

Untuk $f'_c \geq 30$ Mpa

$\beta_1 = 0{,}85 - 0{,}008\ (f'_c - 30)$

$\beta_1 \geq 0{,}65$

Syarat rasio penulangan yang digunakan :

$\rho_{min} \leq \rho_{pakai} \leq \rho_{mak}$

Syarat tebal selimut beton yang digunakan :

$p \geq 20$ mm

Tinggi efektif balok beton :

$d = h - p - \phi_{sengk} - ½\phi_{tul}$ ..... (11)

Luas tulangan yang diperlukan:

$A_{s\ perlu} = \rho\ x\ b\ x\ d$ ..... (12)

Syarat luas tulangan yang dipasang :

$$A_{s\ pasang} \geq A_{s\ perlu}$$

Syarat jarak bersih antara tulangan yang selapis (dipilih yang terbesar) :

$$s \geq \phi_{tul}$$

$$s \geq 25 \text{ mm}$$

Persamaan (8) dan Persamaan (9) disubtitusikan ke Persamaan (7) :

$$0.85\ f_c'ab = A_s f_y$$

Persamaan momen nominal :

$$M_n = T\ (d - \frac{a}{2}) \text{ atau } C\ (d - \frac{a}{2}) \text{ ..... (13)}$$

$$M_n = A_s f_y\ (d - \frac{a}{2})$$

Keterangan:

ε_c = regangan batas maksimum beton (0,003)

ε_s = regangan tulangan tarik pada regangan batas maksimum beton

ε_y = regangan leleh baja tulangan

E_s = modulus elastisitas baja tulangan (MPa)

f_y = tegangan leleh baja tulangan (MPa)

c = jarak serat tekan terluar ke garis netral (mm)

C = gaya tekan beton (N)

T = gaya tarik baja tulangan (N)

M_n = momen nominal penampang (Nmm)

β_1 = faktor yang besarnya dipengaruhi oleh mutu beton.

a = tinggi blok tegangan persegi ekivalen (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

s = jarak antar tulangan (mm)

$A_{s\ perlu}$ = luas tulangan tarik yang diperlukan (mm^2)

$A_{s\ pasang}$ = luas tulangan tarik yang dipasang (mm^2)

p = tebal selimut beton (mm)

ϕ_{sengk} = diameter tulangan sengkang (mm)

ϕ_{tul} = diameter tulangan lentur (mm)

ρ = rasio tulangan tarik non pratekan

ρ_b = rasio tulangan yang memberikan kondisi regangan yang seimbang

F. Perencanaan Penulangan Geser pada Balok Beton

Perencanaan geser pada penelitian ini berdasarkan peraturan SK SNI 03-2847-2002). Perencanaan geser untuk komponen-komponen struktur terlentur didasarkan pada anggapan bahwa beton menahan sebagian dari gaya geser, sedangkan kelebihannya atau kekuatan di atas kemampuan beton untuk menahannya dilimpahkan kepada tulangan baja. Cara yang sering dipakai untuk penulangan geser ialah menggunakan sengkang vertikal, selain pelaksanaannya lebih mudah juga menjamin ketepatan pemasangannya.

1. Kekuatan Geser dari Balok Yang Bertulangan Geser

Perencanaan kekuatan geser menurut peraturan (SK SNI 03-2847-2002) adalah dengan jalan meninjau kekuatan geser nominal (V_n) sebagai jumlah dari dua bagian:

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{.....} \quad (14)$$

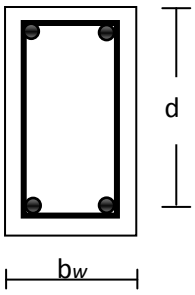
$$V_u \leq \phi V_n \quad \text{.....} \quad (15)$$

$$V_u \leq \phi V_c + \phi V_s$$

Untuk menentukan besar tegangan geser terfaktor menggunakan persamaan:

$$v_u = \frac{V_u}{\phi\, b\, d} \quad \text{.....} \quad (16)$$

$$v_u = \frac{V_c}{b_w d} + \frac{V_s}{b_w d}$$



Gambar 4. Penampang balok beton bertulang

Persamaan (16) menunjukkan bahwa suku pertama (V_c/bd) adalah kapasitas tegangan geser beton, sedangkan suku kedua (V_s/bd) sebagai kelebihan tegangan geser di atas kapasitas beton yang harus didukung oleh tulangan geser pada balok.

2. Kemampuan Beton Menahan Gaya Geser

Untuk metode yang disederhanakan dengan f'_c dalam MPa, kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk komponen-komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja adalah:

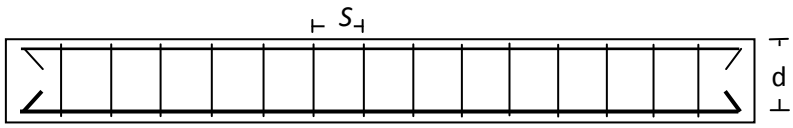
$$V_c = \left(\frac{1}{6}\sqrt{f'_c}\right) b_w\, d \quad \text{.....} \quad (17)$$

3. Sumbangan Kekuatan dari Penulangan Geser

Sumbangan dari penulangan geser jika digunakan sengkang vertikal adalah:

$$V_s = \frac{A_v\ f_y\ d}{s} \quad \text{.....} \quad (18)$$

$$s_{perlu} = \frac{A_v\ f_y\ d}{V_s}$$



Gambar 5. Penampang balok beton bertulang arah memanjang

Peraturan mensyaratkan luasnya tulangan geser minimum adalah:

$$A_v = \frac{b_w\ s}{3\ f_y} \quad \text{.....} \quad (19)$$

$$A_v = 2\ A_s \quad \text{.....} \quad (20)$$

Dalam perencanaan penulangan geser menurut SNI 2002 menyatakan bahwa kuat geser Vs, tidak boleh diambil lebih dari $^{2}/_{3}\sqrt{f'_c}\ b_w\ d$.

4. Kategori dan Persyaratan Perencanaan Geser

a. Kategori 1 ($V_u \leq \frac{1}{2}\phi V_c$)

Untuk kategori ini tidak diperlukan penguatan geser.

b. Kategori 2 ($\frac{1}{2}\phi V_c < V_u \leq \phi V_c$)

Untuk kategori ini diperlukan tulangan geser minimum kecuali untuk unsur unsur lentur tipis yang menyerupai *slab* yang menurut pengalaman dapat berfungsi secara memuaskan tanpa penulangan geser. Unsur-unsur tipis seperti *slab* yang dikecualikan ini termasuk; (a) pelat dan pondasi

pelat; (b) konstruksi lantai joint (dengan balok lintang); (c) balok yang tinggi totalnya tidak lebih dari 250 mm atau 2,5 kali tebal *flens* pada penampang yang berbentuk T atau setengah dari lebar badan balok, diambil mana yang terbesar; (d) tempat di mana nilai $V_u \leq \frac{1}{2}\phi V_c$. Untuk kategori ini penguatan geser harus memenuhi Persamaan (21) dan Persamaan (22), yaitu:

$$V_{s\,perlu} = V_{smin} = \left(\frac{1}{3}\sqrt{f'_c}\right) b_w\, s \quad \text{.....} \quad (21)$$

$$s_{maks} = {}^{d}/_{2} \leq 600\ mm \quad \text{.....} \quad (22)$$

c. Kategori 3 $\left(\phi V_c < V_u \leq \left(\phi V_c + \phi V_{s\min}\right)\right)$

Untuk kategori ini semua unsur lentur termasuk yang dikecualikan dalam kategori 2, harus diberikan penguatan geser yang memenuhi Persamaan (21) dan Persamaan (22).

d. Kategori 4 $\left(\left(\phi V_c + \phi V_{s\min}\right) < V_u \leq \left(\phi V_c + \phi\ {}^{1}/_{3}\sqrt{f'_c}\ b_w\, d\right)\right)$

Untuk kategori ini persyaratan penulangan geser yang dihitung akan melebihi $\phi V_{s\min}$ yang disyaratkan dan penguatan geser harus memenuhi Persamaan (23), Persamaan (18) dan Persamaan (22):

$$V_{s\,perlu} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi} \quad \text{.....} \quad (23)$$

$$V_{s\,ada} = \frac{A_v\ f_y\ d}{s}$$

$$s_{maks} = {}^{d}/_{2} \leq 600\ mm$$

e. Kategori 5 $\left(\left(\phi V_c + \phi\ {}^{1}/_{3} \sqrt{f'_c}\ b_w\, d\right) < V_u \le \left(\phi V_c + \phi\ {}^{2}/_{3} \sqrt{f'_c}\ b_w\, d\right) \right)$

Persyaratan penguatan geser harus memenuhi Persamaan (23), Persamaan (18) dan Persamaan (24) :

$$V_{s\,perlu} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi}$$

$$V_{s\,ada} = \frac{A_v\ f_y\ d}{s}$$

$$s_{maks} = {}^{d}/_{4} \le 300\ mm \quad \text{.....} \quad (24)$$

Keterangan :

V_u = kuat geser ultimit (N)

v_u = tegangan geser terfaktor (MPa)

V_c = kuat geser nominal beton (N)

V_s = kuat geser nominal tulangan geser (N)

V_n = kuat geser nominal total (N)

f_y = mutu baja tulangan geser (MPa)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

b_w = lebar efektif balok (mm)

d = tinggi efektif balok (mm)

ϕ = faktor reduksi kekuatan (standar SNI untuk V_c dan V_s = 0,65)

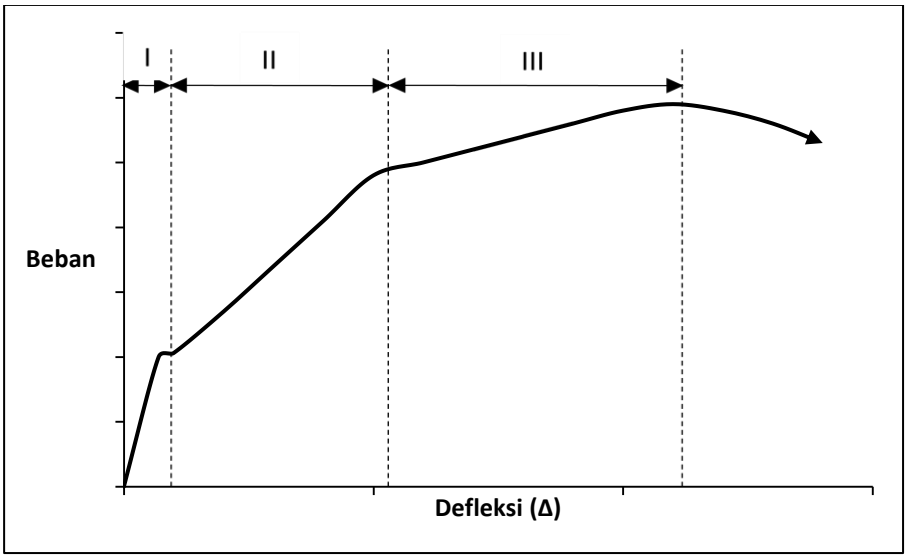
A_v = luas penampang tulangan geser total (mm^2)

A_s = luas penampang tulangan geser (mm^2)

S = Jarak sengkang (mm)

G. Perilaku Defleksi Pada Balok

Nawy (2008), menjelaskan di dalam bukunya bahwa hubungan beban-defleksi balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinier seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan beban-defleksi pada balok

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa hubungan beban-defleksi terdiri atas tiga daerah sebelum terjadinya *rupture*, yaitu :

- Daerah I (taraf praretak), dimana batang-batang strukturalnya bebas retak.
- Daerah II (taraf pascaretak), dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya.
- Daerah III (taraf pasca-*serviceability*), dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya.

1. Taraf Praretak

Segmen praretak dari kurva beban-defleksi pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah ini lebih kecil daripada kekuatan tariknya akibat lentur, atau lebih kecil dari modulus *rupture* (f_r) beton. Kekakuan lentur (EI) balok dapat diestimasi dengan menggunakan modulus elastisitas (E_c) dari beton dan momen inersia penampang beton bertulang tak retak.

Besarnya E_c untuk beton normal diestimasikan dengan persamaan berikut :

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad \text{.....(25)}$$

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

f_c' = kuat tekan beton (MPa)

Estimasi akurat mengenai momen inersia (I) memerlukan peninjauan kontribusi luas tulangan (A_s). Hal ini dapat dilakukan dengan mengganti luas tulangan baja dengan luas beton yaitu $(E_s/E_c)A_s$, karena besarnya modulus elastisitas E_s dari tulangan baja lebih besar dari modulus elastisitas beton E_c.

2. Taraf Beban Pascaretak

Daerah praretak diakhiri dengan mulainya retak pertama dan mulai bergerak menuju daerah II pada kurva beban-defleksi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Hampir semua balok terletak pada daerah ini pada saat beban kerja. Suatu balok dapat mengalami berbagai taraf

keretakan di sepanjang bentangnya sesuai dengan taraf tegangan dan defleksi pada masing-masing bagiannya. Dengan demikian, untuk suatu balok di atas tumpuan sederhana, retak akan semakin lebar dan semakin dalam pada lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar.

Apabila sudah terjadi retak lentur, kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan lentur penampangnya telah berkurang sehingga kurva beban-defleksi di daerah ini akan semakin landai dibandingkan dengan pada saat tahap praretak. Semakin besar retaknya maka akan semakin berkurang kekakuannya hingga mencapai suatu harga yang berupa *lower-bound* (batas bawah) sehubungan dengan momen inersia penampang retak.

3. Taraf *Post-serviceability*

Kurva beban-defleksi daerah III pada Gambar 6 di atas jauh lebih datar dibandingkan dengan daerah-daerah sebelumnya. Hal ini diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar di sepanjang bentang. Jika beban terus menerus bertambah, maka regangan tulangan (ε_s) pada sisi yang tertarik akan terus bertambah dan melebihi regangan lelehnya (ε_y) tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya mulai leleh dikatakan telah runtuh secara struktural karena balok terus menerus mengalami defleksi tanpa adanya penambahan beban dan retaknya semakin besar sehingga garis netralnya mendekati serat tepi balok yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan

skunder yang dapat mengakibatkan kehancuran total pada daerah momen maksimum balok dan segera diikuti dengan terjadinya *rupture*.

Bertambahnya taraf beban dimulai dari leleh pertama tulangan tarik pada balok sederhana sampai pada taraf beban rupture bervariasi, yaitu antara 4% sampai 10%. Akan tetapi besarnya defleksi sebelum rupture dapat lebih besar beberapa kali dari defleksi pada saat beban yang menyebabkan leleh pertama, tergantung pada perbandingan bentang-tinggi balok, persentase tulangan dan jenis beban. Dari percobaan-percobaan yang banyak dilakukan diperoleh bahwa besarnya defleksi maksimum berkisar antara 8 sampai 12 kali defleksi pertama.

Keterangan :

E_c : Modulus elastisitas beton (MPa)

f'_c : Kuat tekan beton (MPa)

E_s : Modulus elastisitas baja (Mpa)

ε_s : Regangan tulangan tarik pada regangan batas maksimum beton

ε_y : Regangan leleh baja tulangan

A_s : Luas tulangan tarik baja tulangan (mm^2)

I : Momen inersia penampang persegi (mm^4)

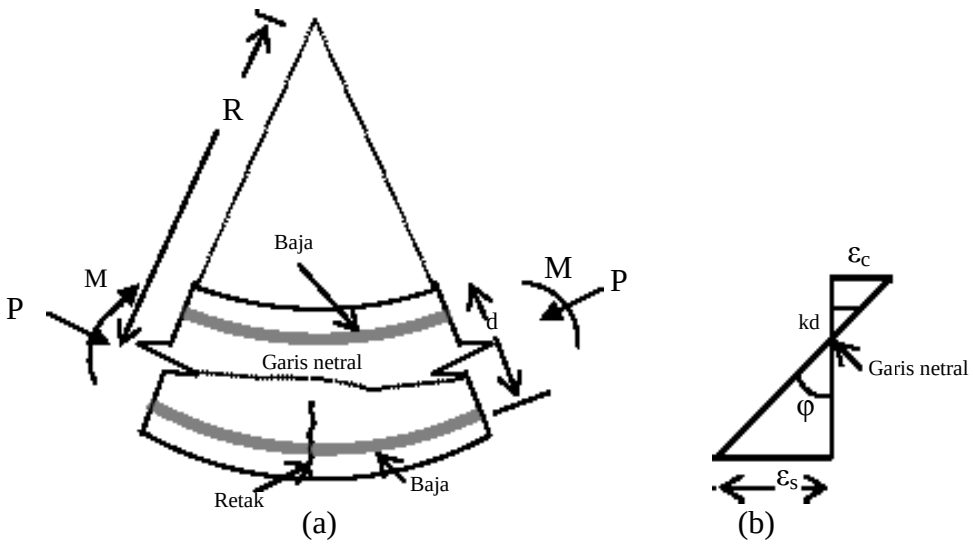
f_r : Modulus rupture beton (MPa)

EI : Kekakuan lentur balok (Nmm^2)

Δ : Defleksi balok (mm)

H. Hubungan Momen – Kurvatur Pada Balok

Park & Paulay (1975) memberi penjelasan di dalam bukunya tentang hubungan antara momen-kurvatur pada balok beton bertulang. Kurvatur (φ) adalah kelengkungan yang didapat dari hasil pembagian regangan pada serat atas beton dengan jarak serat tekan terluar ke garis netral. Salah satu parameter untuk mengetahui kedaktilan suatu elemen struktur yaitu berdasarkan nilai kurvatur. Balok beton bertulang yang daktil adalah balok beton bertulang yang mampu mempertahankan momen yang terjadi pada saat tulangan baja mengalami leleh. Sebuah beton bertulang yang pada mulanya lurus namun akibat adanya momen ujung dan gaya aksial maka balok menjadi lengkung seperti yang diperlihatkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 7. Deformasi pada balok lentur (a) elemen balok (b) distribusi regangan

Jari-jari kurvatur (R), tinggi sumbu netral (k_d), regangan beton pada serat tekan terluar (ε_c) dan regangan baja (ε_s) akan berubah-ubah sepanjang bentang karena adanya retak beton yang juga memberikan tegangan. Dengan

pertimbangan hanya satu elemen panjang dx pada balok dan penggunaan notasi pada gambar diatas, maka rotasi antara ujung-ujung elemen diberikan oleh:

$$\frac{dx}{R} = \frac{\varepsilon_c\, dx}{kd} = \frac{\varepsilon_s\, dx}{d(1-k)}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)}$$

1/R adalah kelengkungan pada elemen (rotasi persatuan panjang balok) dan diberi symbol φ. Dengan begitu kita mendapatkan persamaan berikut :

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad \text{.....(26)}$$

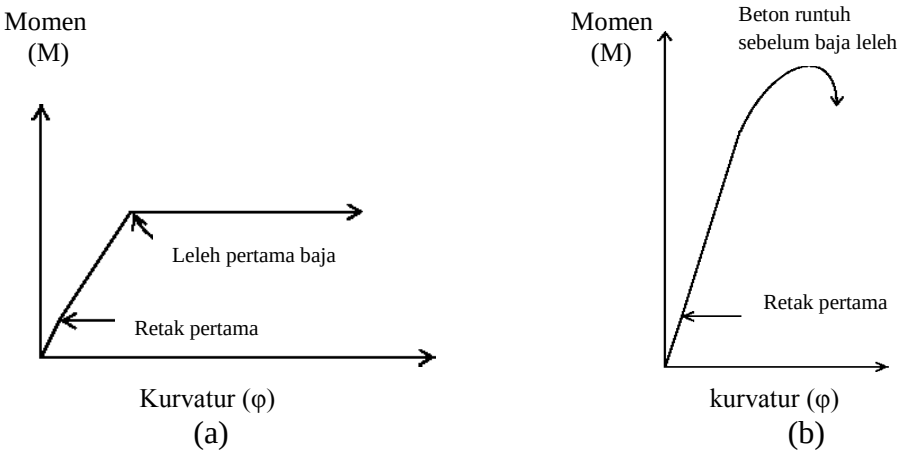
jelas bahwa kurvatur φ adalah gradien regangan profil pada elemen, seperti dalam Gambar 7.

Kurvatur selalu berubah-ubah sepanjang bentang karena adanya fluktuasi ketinggian sumbu netral dan regangan antara setiap retak. Jika panjang elemen memiliki retak, kurvatur didapat dari Persamaan (26), dengan ε_c dan ε_s sebagai regangan pada bagian retak.

Jika regangan pada bagian kritis balok beton bertulang yang diukur atas jarak ukur pendek sebagai momen lentur ditingkatkan untuk mencapai keruntuhan, kurvatur dihitung dari Persamaan (26), maka hubungan momen-kurvatur untuk bagian tersebut dapat diperoleh. Kedua kurva diperoleh pada perhitungan balok bertulangan tunggal saat gagal tarik dan tekan seperti tampak dalam Gambar 8 dan kedua kurva pada mulanya linear. Hubungan

antara momen (M) dan kurvatur (φ) diberi oleh persamaan elastis sebagai berikut :

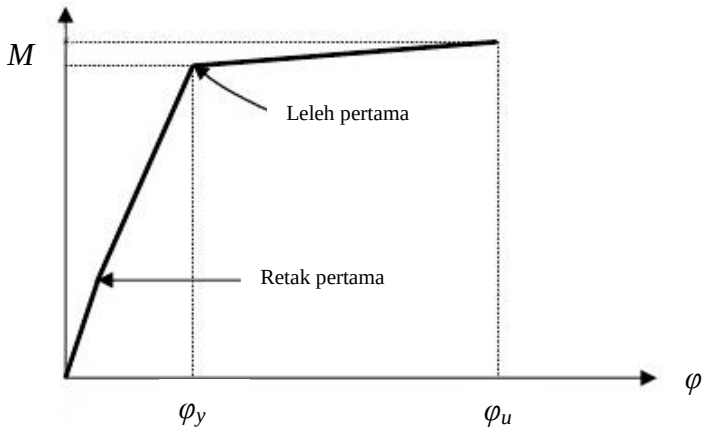
$$EI = M.R = \frac{M}{\varphi} \quad \text{.....(27)}$$



Gambar 8. Hubungan momen kurvatur untuk balok beton bertulangan tunggal. (a) saat gagal tarik,$\rho < \rho_b$.(b) saat gagal tekan,$\rho > \rho_b$

Dengan meningkatnya momen maka retak yang timbul pada beton mengurangi kekakuan lentur. Pengurangan kekakuan untuk potongan beton dengan tulangan kecil lebih besar dibanding beton dengan tulangan besar. Perilaku potongan setelah retak sangat bergantung pada mutu baja. Potongan beton dengan tulangan kecil (Gambar 8.a) menghasilkan kurva linear M-φ membengkok sampai ke titik leleh baja. Saat baja leleh, kurvatur meningkat dengan pesat sedangkan momen lentur hampir konstan, momen meningkat secara perlahan-lahan menuju maksimum dan kemudian menurun. Pada potongan beton dengan tulangan besar (Gambar 8.b), kurva M-φ menjadi tidak linear ketika beton memasuki bagian inelastik hubungan tegangan-regangan, dan keruntuhan dapat menjadi getas (*brittle*) kecuali jika beton dikekang oleh sengkang tertutup. Jika beton tidak dikekang, maka beton akan

hancur pada kurvatur yang relatif kecil walaupun baja saat itu belum meleleh, dan ini menyebabkan kapasitas daya dukung-momen turun dengan cepat.



Gambar 9. Kurva momen-kurvatur ideal untuk balok beton bertulangan tunggal yang gagal dalam tarik

Hubungan momen-kurvatur untuk balok praktis yang mana tegangan baja leleh dapat diidealkan dengan hubungan trilinier yang diperlihatkan dalam Gambar 9. Pertama munculnya retakan, kedua tegangan baja meleleh dan ketiga batas kemampuan regangan beton tercapai.

Keterangan :

d : jarak pusat tulangan tarik ketepi ujung balok/tinggi efektif (mm)

kd : jarak garis netral ke tepi serat terluar beton yang tertekan (mm)

EI : kekakuan lentur balok (Nmm^2)

φ : kurvatur (rad/mm)

φ_y : kurvatur saat pertama baja leleh (rad/mm)

φ_u : kurvatur saat beban ultimit (rad/mm)

ε_c : regangan tekan beton (mm)

ε_s : regangan tarik baja (mm)

R : jari-jari kelengkungan balok (mm)

M : momen lentur (Nmm)

P : gaya aksial (N)

k : faktor jarak garis netral

ρ : rasio tulangan tarik