

## BAB III LANDASAN TEORI

Agar penelitian yang dilakukan tidak menyimpang maka diperlukan adanya suatu landasan teori supaya hasil yang dicapai dapat dipertanggungjawabkan dan diselesaikan dengan teori-teori dan rumus yang biasa digunakan.

### 3.1 Balok Beton Bertulang

Balok merupakan bagian struktural yang fungsi utamanya untuk memikul beban transversal, yang dapat berupa beban lentur, geser maupun torsi (Sudarmoko, 1996).

Menurut Nawy (1990), asumsi-asumsi yang digunakan dalam menetapkan perilaku penampang balok adalah sebagai berikut :

1. Distribusi regangan dianggap linier. Asumsi ini berdasarkan hipotesis Bernouli yaitu penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur.
2. Regangan pada baja dan beton di sekitarnya sama sebelum terjadi retak pada beton atau leleh pada baja.
3. Beton lemah terhadap tarik. Beton akan retak pada taraf pembebanan kecil, yaitu sekitar 10% dari kekuatan tekannya. Akibatnya bagian beton yang mengalami tarik pada penampang diabaikan dalam perhitungan analisis dan desain, juga tulangan tarik yang ada dianggap memikul gaya tarik tersebut.

Beton merupakan suatu material yang menyerupai batu yang diperoleh dengan membuat satu campuran yang mempunyai proporsi tertentu dari semen, pasir, koral atau agregat serta air. Beton dalam berbagai sifat kekuatan dapat diperoleh dengan pengaturan yang sesuai dari perbandingan komposisi material

pembentuknya tergantung dari kekuatan yang diinginkan sehingga dapat diupayakan berbagai cara untuk meningkatkan sifat-sifat mekanis beton, antara lain kelecakan/sifat mudah dikerjakan (*workability*), *placebility*, kekuatan (*strength*), daya tahan terhadap penurunan mutu akibat pengaruh cuaca (*durability*), susut/sifat dapat tembus (*permeability*), *corrosivity* dan lain-lain (Nilson, 1978).

Kerusakan pada struktur balok beton umumnya terjadi akibat lentur dan geser. Lentur pada balok beton ditahan oleh tulangan lentur atau tulangan memanjang yang biasanya mempunyai kelemahan terhadap kuat tarik dan bersifat getas/*brittle* (Dipohusodo, 1994).

### 3.2 Sifat-Sifat Mekanik Beton

Beton merupakan suatu material yang menyerupai batu yang diperoleh dengan membuat suatu campuran yang mempunyai proporsi tertentu dari semen, pasir dan koral atau agregat lainnya (Winter dan Nilson, 1993). Sifat-sifat mekanik beton terdiri dari 4 macam, yaitu: kuat desak, kuat tarik belah, kuat lentur dan kuat geser beton.

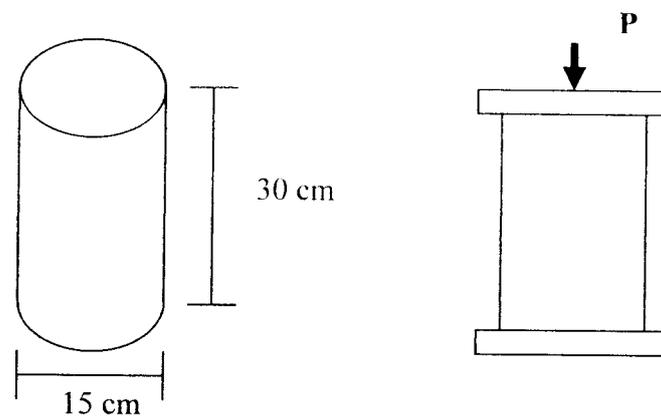
#### 1. Kuat desak beton

Pada umumnya kegunaan yang terbaik dari beton adalah pemanfaatan pada kekuatan tekannya (Winter dan Nilson, 1993). Kuat desak beton dipengaruhi oleh komposisi dan kekuatan masing-masing bahan susun dan lekatan pasta semen pada agregat. Nilai kuat desak beton dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$f^c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

dengan: P = Beban maksimum (kN)

A = Luas penampang silinder,  $\frac{1}{4}\pi.d^2$



Gambar 3.1 Uji desak

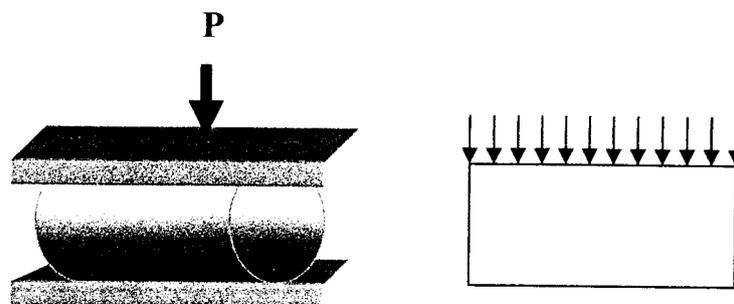
2. Kuat tarik belah beton

Nilai kuat tarik belah beton dihitung dengan persamaan berikut :

$$f_t = \frac{2.P}{\pi.L.D} \quad (3.2)$$

dengan :  
 P = Beban maksimum (kN)  
 D = Diameter benda uji (cm)  
 L = Tinggi benda uji (cm)

Beton sangat mampu menahan tegangan tekan tetapi, hampir tidak dapat menahan tegangan tarik (Vis dan Kusuma, 1997). Istimawan (1994) mengatakan bahwa nilai kuat tarik beton hanya berkisar 9%-15% saja dari kuat tekannya.



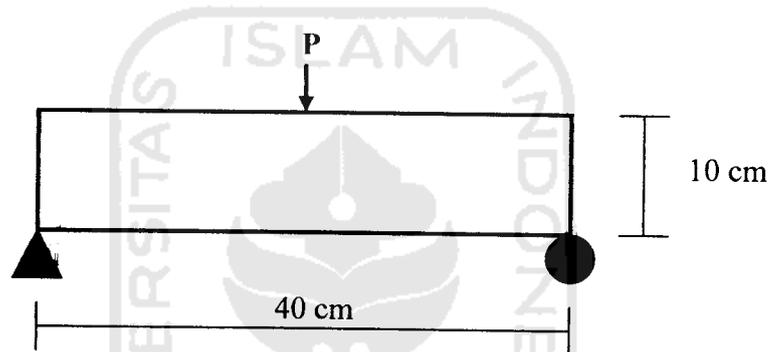
Gambar 3.2 Uji tarik belah

### 3. Kuat lentur beton

Nilai kuat lentur dihitung dengan persamaan berikut.

$$f_l = \frac{3.P.l}{2.b.h^2} \quad (3.3)$$

dengan: P = Beban maksimum (kg)  
 l = Panjang antar tumpuan (cm)  
 b = Lebar benda uji (cm)  
 h = Tinggi benda uji (cm)



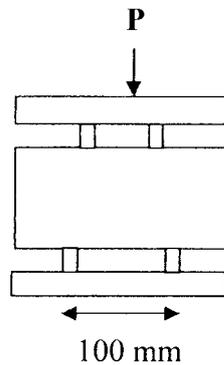
Gambar 3.3 Uji lentur

### 4. Kuat geser beton

Gaya geser yang terjadi akibat beban P pada balok dapat dieliminir oleh adanya penambahan tulangan geser, namun demikian beton juga ikut serta dalam menahan gaya geser yang terjadi, meskipun kecil beton masih memberikan kontribusi terhadap besarnya nilai kuat geser balok. Nilai kuat geser dihitung dengan persamaan berikut.

$$f_{sh} = \frac{P}{2.L} \quad (3.4)$$

dengan : P = Beban maksimum (kN)  
 L = Luas penampang, lebar x tinggi (cm<sup>2</sup>)



**Gambar 3.4 Uji geser**

### 3.3 Analisa Lentur

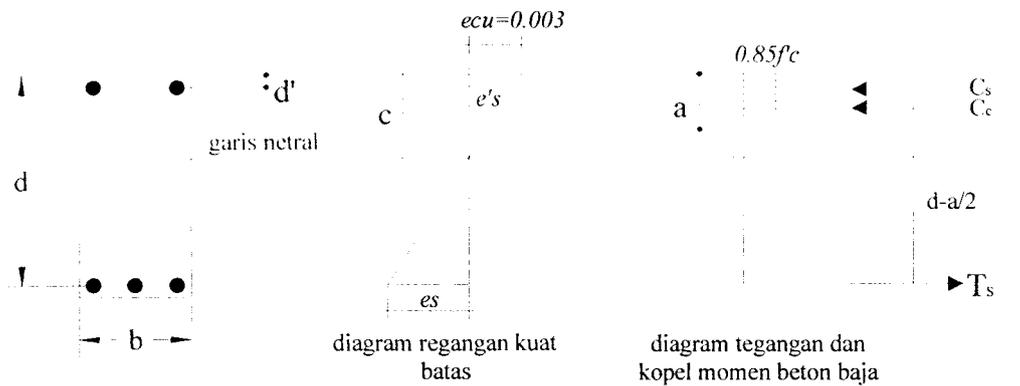
Kuat lentur nominal atau momen tahanan penampang balok adalah kapasitas tegangan-tegangan dalam yang membentuk sebuah momen kopel sebagai perlawanan dari momen lentur luar yang timbul sebagai akibat beban luar (Dipohusodo, 1994). Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya per satuan luas permukaannya tempatnya bekerja (Timoschenko dan Gere, 1961).

Balok mempunyai tulangan rangkap apabila mempunyai tulangan tarik dan tulangan desak sekaligus. Pemakaian tulangan desak ini dikarenakan tulangan nominal lentur ( $M_n$ ) yang ada belum mencukupi untuk mendukung momen yang terjadi dan juga bermanfaat untuk pembebanan bolak-balik.

Pada balok bertulangan rangkap, penampangnya secara teoritis dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

1. Bagian yang bertulangan tunggal, termasuk balok segi empat ekuivalen, dengan luas tulangan tarik adalah  $A_s - A_{s2}$ ,
2. Bagian bertulangan ganda, dengan asumsi baja tulangan tarik dan desak, ekuivalen luasnya sama.

Dipohusodo (1994) mengemukakan analisis momen kapasitas balok tulangan rangkap dengan mengacu pada gambar 3.5 adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.5** Penampang beton bertulang dengan diagram regangan dan tegangan (Dipohusodo, 1994)

Ada dua kemungkinan yang akan dialami oleh penampang balok tulangan rangkap :

- Apabila  $\epsilon'_s \geq \epsilon_y$  dan  $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ , maka baja tekan dan tarik leleh.
- Apabila  $\epsilon'_s < \epsilon_y < \epsilon_s$ , maka baja tarik telah leleh, tetapi baja tekan belum leleh.

dengan :  $\epsilon'_s$  = regangan baja tekan

$\epsilon_s$  = regangan baja tarik

$\epsilon_y$  = regangan leleh baja

### 1. Kondisi Seimbang

Menganggap semua tulangan telah leleh, sehingga gaya-gaya dalam dari Gambar 3.5 dihitung dengan rumus :

$$C_c = 0,85 f'_c a b \quad (3.5)$$

$$C_s = A'_s f_y \quad (3.6)$$

$$T_s = A_s f_y \quad (3.7)$$

dengan,  $C_c$  = gaya tekan pada beton

$C_s$  = gaya tekan pada baja

$T_s$  = gaya tarik pada baja

$f'_c$  = kuat tekan beton

$f_y$  = tegangan leleh baja

$a$  = tinggi balok tegangan

$b$  = lebar balok

$A_s$  = luas baja tarik

$A'_s$  = luas baja desak

Persamaan keseimbangan didapat :

$$C_c + C_s = T_s \quad (3.8)$$

$$0,85 f'_c a b + A'_s f_y = A_s f_y \quad (3.9)$$

sehingga dari persamaan 2.5 didapat nilai  $a$  :

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0,85 f'_c b} \quad (3.10)$$

sehingga momen nominal untuk tulangan rangkap dapat dihitung dengan persamaan :

$$M_n = (A_s - A'_s) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \quad (3.11)$$

dengan :  $M_n$  = momen nominal (kNm)

$d$  = tinggi efektif balok (m)

$d'$  = jarak dari tepi serat tertekan ke pusat tulangan tekan (m)

## 2. Kondisi patah tesak

Apabila  $\epsilon'_s < \epsilon_y < \epsilon_s$ , baja tekan belum leleh maka dicari nilai adalah dari persamaan keseimbangan dan diagram tegangan pada Gambar 3.5 sehingga didapat nilai  $a$  :

$$(0,85 f'_c \beta_1 b) c^2 + (600 A'_s - A_s f_s) c - (600 \cdot 0,85 d A'_s) = 0 \quad (3.12)$$

nilai dari tegangan baja tekan dicari dengan persamaan :

$$f'_s = \epsilon'_s E_s = 0,003 \{ (a - \beta_1 d) / a \} E_s \quad (3.13)$$

dengan :  $f'_s$  = tegangan baja tekan

$\beta_1$  = konstanta yang merupakan fungsi kelas kuat beton

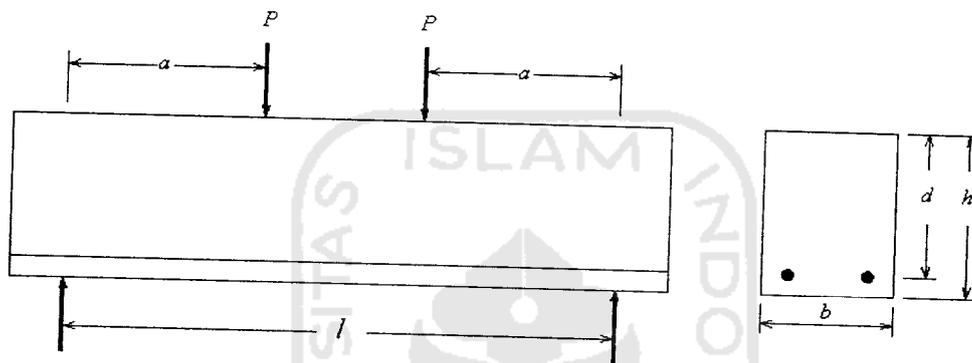
maka momen nominal dapat dicari dengan persamaan :

$$M_n = 0,85 f'_c a b \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (3.14)$$

### 3.4 Analisa Geser

#### 3.4.1 Jenis-jenis kegagalan balok tanpa penulangan tarik diagonal

Pada daerah yang mengalami momen besar, retak yang terjadi dapat disebut retak lentur. Pada daerah yang gesernya besar, akibat tarik diagonal dapat terjadi retak miring sebagai kelanjutan dari retak lentur, dan disebut retak geser lentur (Nawy, 1990).

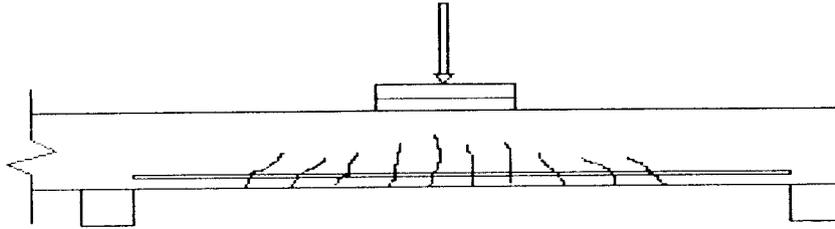


**Gambar 3.6** Pengaruh  $a/d$  dan tebal balok terhadap perlawanan geser

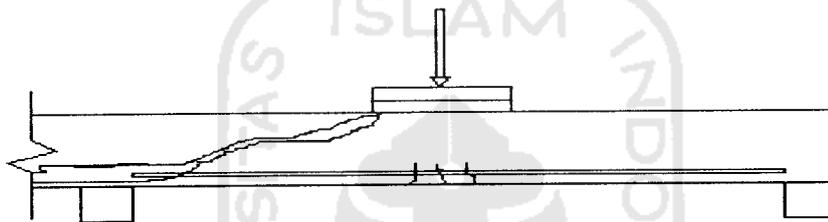
Berdasarkan nilai  $a/d$  (kelangsingan balok) dimana  $a$  dan  $d$  sebagaimana Gambar 3.6, cara keruntuhan geser balok dapat diketahui dari tipe-tipe keruntuhannya (Nawy, 1990):

#### 1. Keruntuhan Tarik Diagonal

Keruntuhan ini dapat terjadi apabila kekuatan balok dalam diagonal tarik lebih kecil daripada kekuatannya. Perbandingan antara bentang geser dengan tinggi penampang adalah menengah, yaitu bervariasi antara 2,5 dan 5,5 untuk beban terpusat. Balok demikian disebut balok dengan kelangsingan menengah. Retak-retak mulai terjadi di tengah bentang, berarah vertikal, yang berupa retak halus dan diakibatkan oleh lentur. Hal ini diikuti pula dengan rusaknya lekatan antara baja tulangan dengan beton di sekitarnya, pada perletakan. Untuk mencapai kestabilan satu retak diagonal ini melebar ke dalam retak tarik diagonal utama, dan diperlihatkan dalam gambar 3.7a dan 3.7b



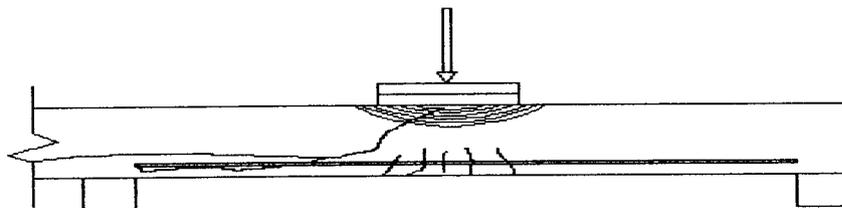
**Gambar 3.7a** Pola keretakan lentur



**Gambar 3.7b** Pola keretakan tarik diagonal

## 2. Kegagalan Tekan-Geser

Balok-balok yang mengalami keruntuhan demikian mempunyai perbandingan antara bentang geser dengan tinggi penampang  $a/d$  sebesar 1 sampai 2,5 untuk beban terpusat dan kurang dari 5 untuk beban terdistribusi. Seperti pada tarik diagonal keruntuhan ini dimulai dengan timbulnya retak halus vertikal di tengah bentang dan tidak terus menjalar, karena terjadinya kehilangan lekatan antara tulangan membujur dengan beton di sekitarnya pada daerah perletakan. Pola tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Pola keretakan Tekan geser

### 3. Keruntuhan lentur

Pada daerah yang mengalami keruntuhan lentur, retak akan terjadi terutama pada sepertiga tengah bentang, dan tegak lurus terhadap tegangan utama. Retak ini disebabkan oleh tegangan geser yang sangat kecil dan tegangan lentur yang sangat dominan yang besarnya hampir mendekati tegangan utama horizontal. Dalam keadaan runtuh lentur demikian, beberapa retak halus berarah vertikal terjadi di daerah tengah bentang.

Dan apabila beban bertambah terus maka retak-retak di tengah bentang bertambah, dan retak awal yang sudah terjadi akan semakin lebar dan semakin panjang menuju sumbu netral penampang. Hal ini bersamaan dengan semakin besarnya lendutan di tengah bentang. Jika balok tersebut under reinforced maka keruntuhan ini merupakan keruntuhan yang daktail yang ditandai dahulu dengan lelehnya tulangan tarik. Perilaku daktail ini memberikan peringatan terlebih dahulu kepada pemakai bangunan sebelum terjadinya kehancuran total balok (*collapse*).

Andaikan beban balok sendiri diabaikan maka kedua tepi balok di antara perletakan dan beban terpusat terdapat besar gaya lintang yang besarnya konstan. Sedangkan besar gaya lintang di tengah balok sama dengan nol. Secara umum distribusi tegangan geser elastis ( $v$ ) yang berlaku adalah :

$$v = \frac{V.S}{b.I} \quad (3.15)$$

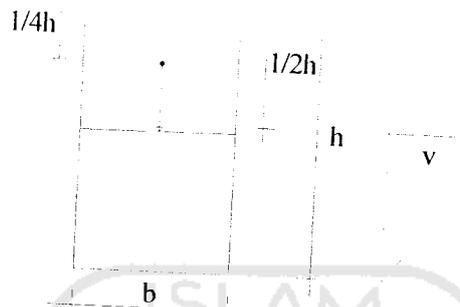
dengan,  $V$  = gaya lintang,

$S$  = momen statis dari bagian yang tergeser terhadap garis netral,

$b$  = lebar balok,

$I$  = momen inersia penampang.

Menurut Vis dan Gideon (1993) distribusi gaya geser dapat digambarkan sebagai bentuk parabolis pada penampang homogen. Seperti terlihat pada Gambar 3.9 berikut:

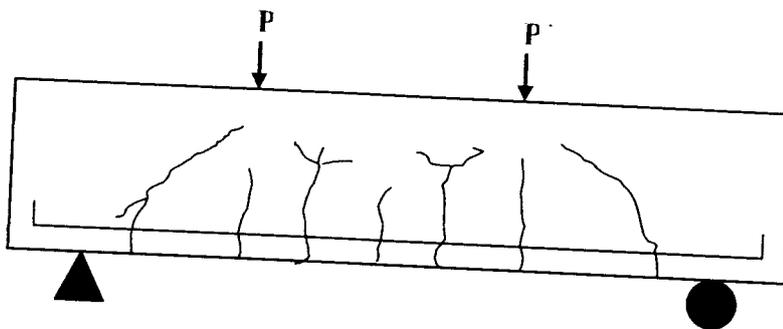


**Gambar 3.9** Distribusi tegangan geser berbentuk parabolis pada penampang homogen (Vis dan Gideon, 1993)

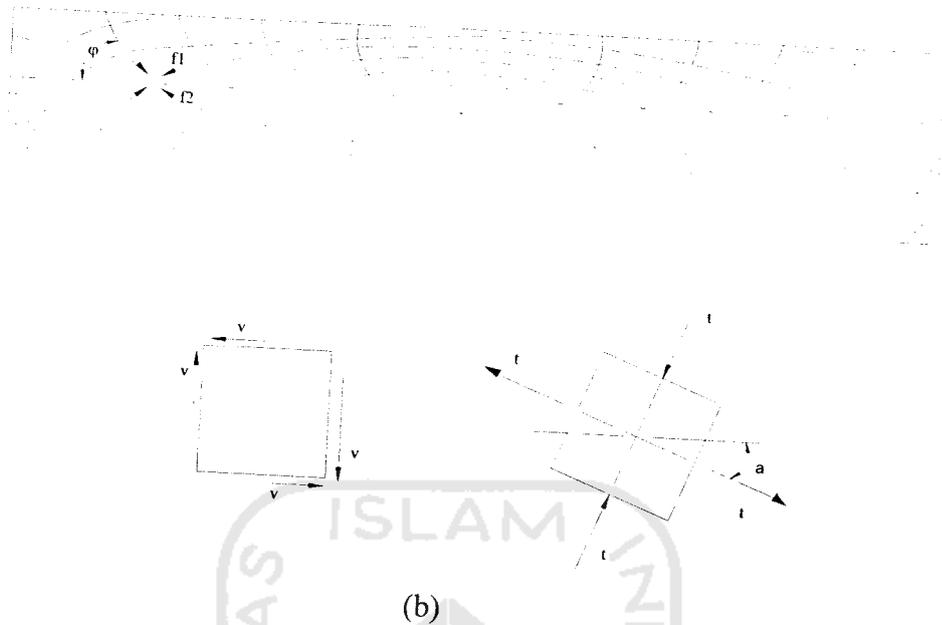
Untuk penampang persegi nilai maksimum tegangan geser :

$$v_{maks} = \frac{V.S}{b.I} = \frac{V \cdot 1/2 \cdot b \cdot h \cdot 1/4 \cdot h}{b \cdot 1/12 \cdot b \cdot h^3} = \frac{3V}{2 \cdot b \cdot h} \quad (3.16)$$

Bila beban  $P$  ditingkatkan, maka pada daerah tarik akan terjadi retakan dan perilaku material pun tidak homogen lagi. Dalam balok terbentuk trayektori tekan dengan trayektori tarik. Secara garis besar retakan dapat dilihat pada Gambar 3.10 a, sedangkan trayektori tekan dengan trayektori tarik ditunjukkan pada Gambar 3.10 b.



(a)



**Gambar 3.10** Retakan, trayektori tekan dan trayektori tarik

Pola retak yang terjadi setelah diberi beban seperti pada gambar 3.10a, arah rambatannya menuju titik beban dan cenderung membentuk sudut  $45^\circ$ . Hal ini terjadi karena adanya gaya tekan dan tarik pada balok yang arahnya berlawanan arah.

Adanya aksi kombinasi dari tegangan-tegangan geser (horisontal dan vertikal) dan tegangan lentur, maka pada sembarang titik dari suatu gelagar terdapat tegangan-tegangan miring tarik dan tekan, dimana harga terbesarnya membentuk sudut  $90^\circ$  antara satu dengan lainnya (Nilson dan Winter, 1983). Dari Gambar 3.10b dapat analisa tegangan-teganagn yang terjadi dengan Persamaan 3.16.

$$t = \frac{f}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f^2}{4} + v^2\right)} \quad (3.17)$$

Dengan,  $t$  = tegangan utama

$f$  = intensitas tegangan normal

$v$  =intensitas tegangan geser

tegangan miring tersebut membuat sudut  $\alpha$  dengan bidang datar, sehingga:

$$\operatorname{tg}(2\alpha) = \frac{2v}{f} \quad (3.18)$$

### 3.4.2 Gaya Geser yang Disumbangkan Beton

Ferguson (1981) menyebutkan pada beton mutu normal dengan atau tanpa sengkang, kekuatan geser nominal yang diberikan beton penampang persegi adalah sebesar:

$$V_c = \left(\frac{1}{6}\sqrt{f_c}\right).b_w.d \quad (3.19)$$

### 3.4.3 Gaya Geser yang Disumbangkan Tulangan Geser

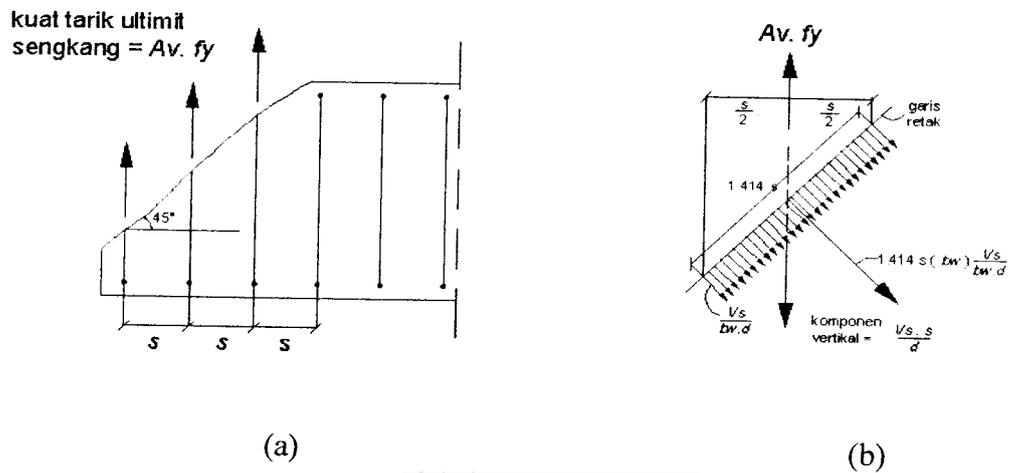
Pengasumsian bahwa semua sengkang leleh saat runtuh, gaya geser yang ditahan oleh sengkang adalah :

$$V_s = \frac{(A_v.f_y.d)}{s} \quad (3.20)$$

Dengan menggunakan konsep tegangan geser SK-SNI T-15-1991-03 (1991) dan memberikan beberapa substitusi, maka didapatkan :

$$v = \frac{V_u}{\phi b_w d} = \frac{\phi(V_c + V_s)}{\phi b_w d} = \frac{V_c}{b_w d} + \frac{V_s}{b_w d} \quad (3.21)$$

Suku pertama ( $V_c/b_w d$ ) adalah kapasitas tegangan geser beton, sedangkan suku kedua sebagai kelebihan tegangan geser di atas kapasitas beton yang harus didukung oleh tulangan baja geser pada balok.



**Gambar 3.11** Menentukan jarak spasi sengkang berdasarkan syarat kekuatan (Dipohusodo, 1994)

Luas daerah tempat bekerjanya tegangan yang harus ditahan oleh tulangan geser adalah  $1,414 sb_w$  (Gambar 3.11b) sehingga gaya tarik diagonal sebesar:

$$1,414 sb_w \left( \frac{V_s}{b_w \cdot d} \right) \quad (3.22)$$

Komponen vertikal gaya tarik diagonal :

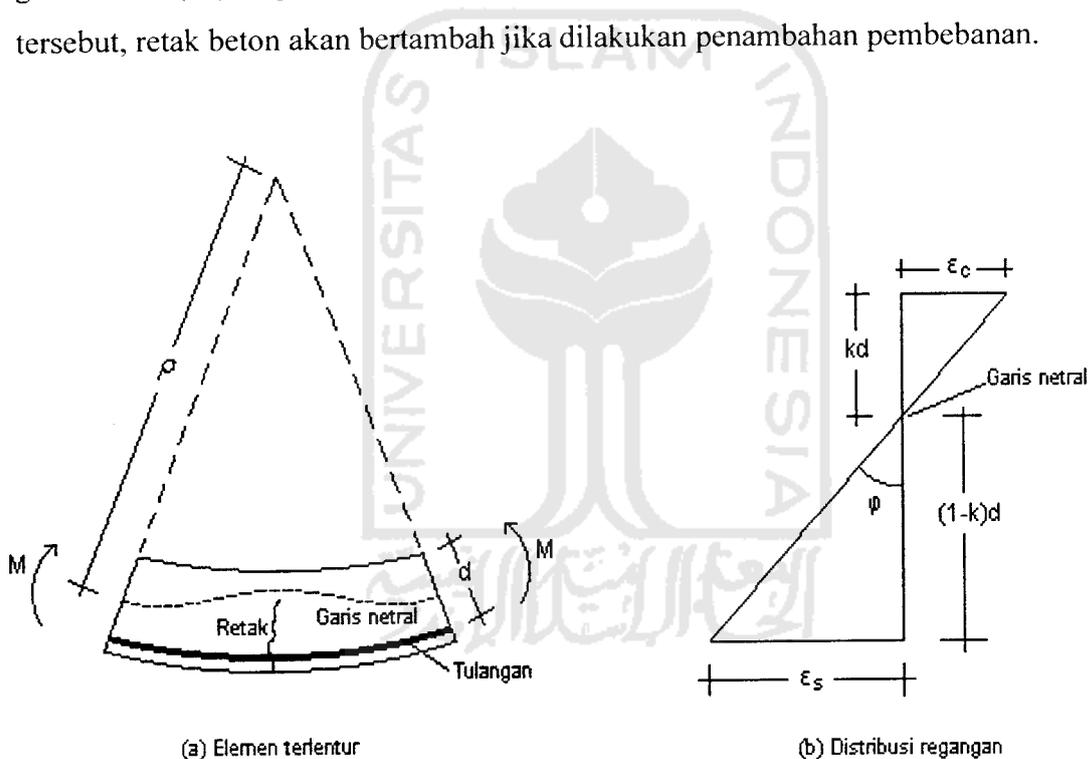
$$0,707 (1,414 sb_w) \frac{V_s}{b_w \cdot d} = sb_w \frac{V_s}{b_w \cdot d} = \frac{V_s \cdot s}{d} \quad (3.23)$$

$A_v \cdot f_y$  adalah kapasitas tarik ultimit sengkang. Karena ke arah vertikal harus terjadi keseimbangan, maka :

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (3.24)$$

### 3.5 Kelengkungan pada Balok

Menurut Park dan Paulay (1975), kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti pada Gambar 1. Jari-jari kelengkungan  $\rho$  diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan ( $\rho$ ), tinggi garis netral ( $kd$ ), regangan beton ( $\epsilon_c$ ) dan regangan baja tarik ( $\epsilon_s$ ). Berdasar teori tersebut, retak beton akan bertambah jika dilakukan penambahan pembebanan.



Gambar 3.12. Kelengkungan balok (Park dan Paulay, 1975)

Menurut Park dan Paulay (1975), kelengkungan suatu garis dalam koordinat Cartesian dinyatakan dengan Persamaan 3.25:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \phi \approx \frac{d^2 y / dx^2}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.25)$$

Jika  $\frac{dy}{dx}$  kecil, maka  $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$  sehingga Persamaan 3.25 akan menjadi:

$$\varphi = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.26)$$

Menganggap sebuah elemen kecil panjang  $dx$  dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.12, maka rotasi di antara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh:

$$\frac{dx}{\rho} = \frac{\varepsilon_c dx}{kd} = \frac{\varepsilon_s dx}{d(1-k)} \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} \quad (3.28)$$

dengan  $\frac{1}{\rho} = \varphi$

dari Gambar 3.9b, jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (3.29)$$

dengan :

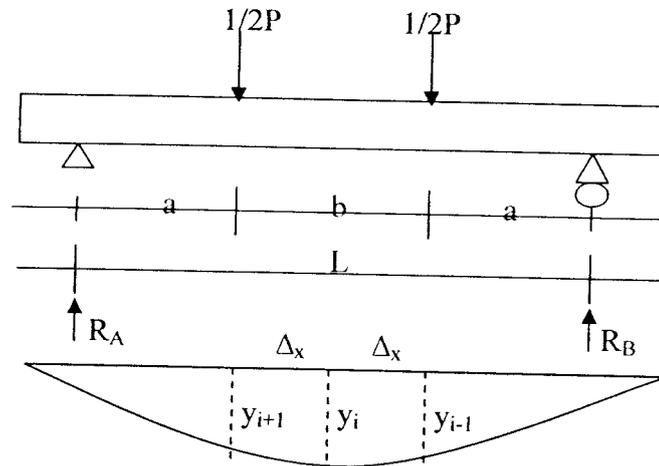
$\varphi$  = kelengkungan

$\varepsilon_c$  = regangan beton

$\varepsilon_s$  = regangan baja

$d$  = tinggi efektif penampang

Apabila pengujian dipasang *strain gauge* pada sisi atas balok dan pada sisi bawah balok sehingga nilai regangan dapat diketahui, maka Persamaan 3.26 dapat digunakan untuk menghitung kelengkungan hasil pengujian dengan lebih teliti.



Gambar 3.13 Lentutan pada tampang memanjang balok

Menurut Friedrich Bleich (1952), Persamaan 3.26 dengan mengacu pada Gambar 3.13 dapat diselesaikan secara numerik dengan pendekatan *central difference*, seperti Persamaan 3.28:

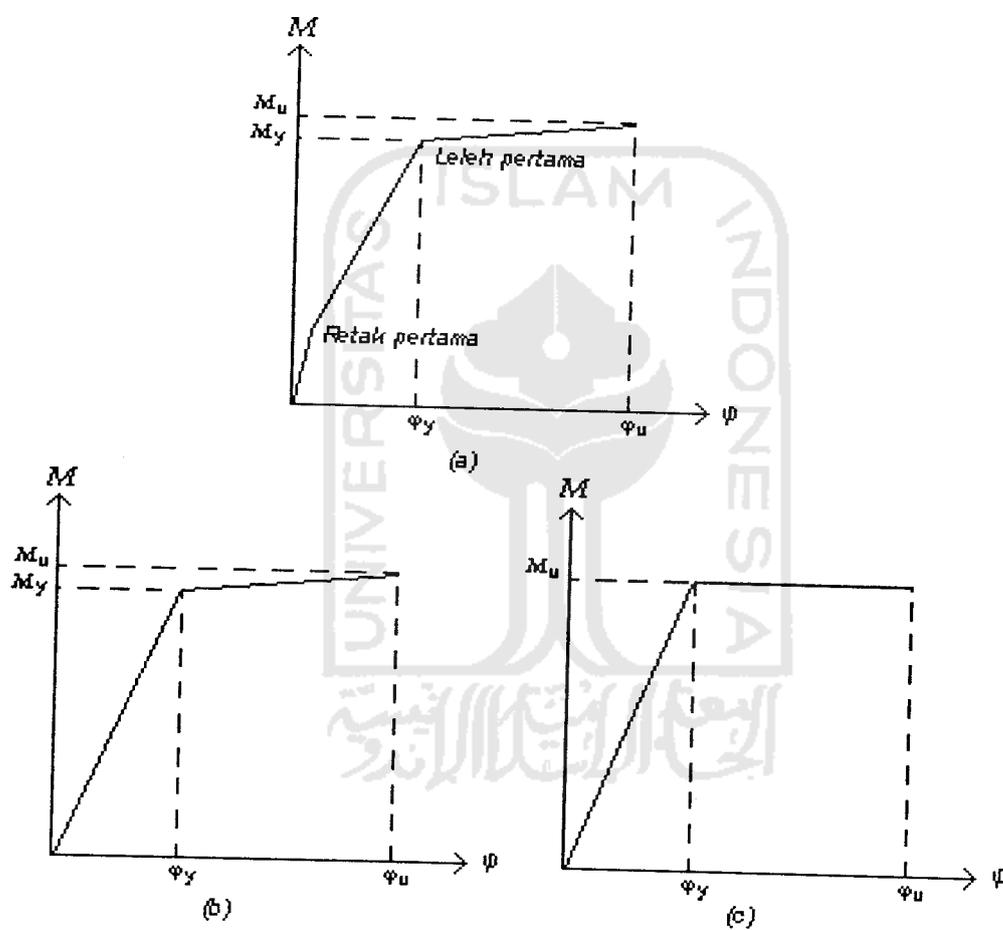
$$\varphi = \frac{y(i+1) - 2y_i + y(i-1)}{\Delta x^2} \quad (3.30)$$

Perhitungan lentutan pada penelitian kali ini menggunakan Persamaan 3.28, karena mudah digunakan dan murah akan tetapi kemungkinan simpangan kesalahan lebih besar jika jarak  $\Delta x$  semakin lebar. Dari Persamaan 3.30 menunjukkan bahwa kelengkungan  $\varphi$  adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.13. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan 3.30. Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan rangkap adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan seperti pada Persamaan 3.31.

$$EI = \frac{M}{\varphi} \quad (3.31)$$

Dimana  $EI$  adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton akan mengurangi faktor kekakuan ( $EI$ ) penampang, keadaan ini ditunjukkan pada Gambar 3.14a. Perilaku dari penampang setelah

retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah peningkatan kurva  $M-\phi$  yang linear di atas titik leleh baja (Gambar 3.14b). Dengan menganggap peningkatan momen yang konstan ketika baja sudah leleh, maka dapat digambarkan hubungan  $M-\phi$  seperti ditunjukkan pada (Gambar 3.14c).

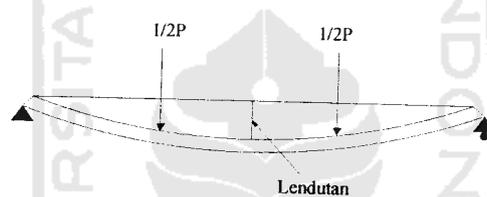


Gambar 3.14. Grafik momen kelengkungan (Park dan Paulay, 1975)

### 3.6. Lendutan pada Balok

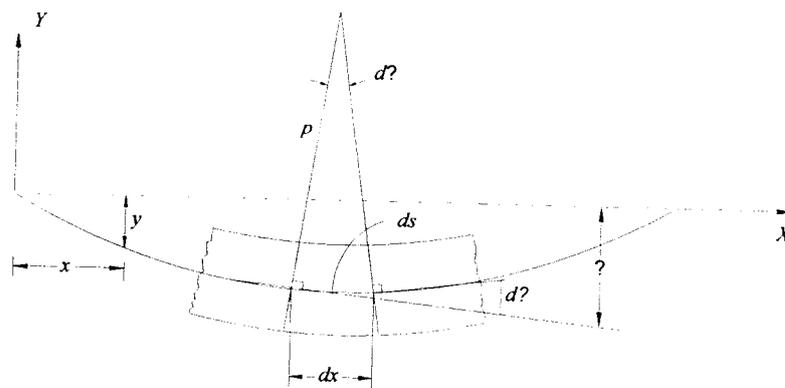
Apabila suatu beban menyebabkan timbulnya lentur, maka balok pasti akan mengalami defleksi atau lendutan seperti terlihat pada Gambar 3.15 meskipun sudah dicek aman terhadap lentur dan geser, suatu balok bisa tidak layak apabila terlalu fleksibel. Dengan demikian tinjauan defleksi balok merupakan salah satu bagian dari proses desain (Spiegel dan Linbrunner, 1991).

Balok adalah salah satu diantara elemen-elemen struktur yang paling banyak dijumpai pada setiap struktur. Momen lentur timbul pada balok sebagai akibat adanya beban pada balok.



Gambar 3.15 Lendutan pada balok

Apabila balok dengan tumpuan sederhana mengalami dua beban transversal terpusat simetris, balok akan melentur atau mengalami defleksi seperti Gambar 3.15.



Gambar 3. 16 Kurva Elastis (Singer dan Pytel, 1985)

Dari Gambar 3.16 kemudian bisa dianalisa lendutan balok dengan metoda integrasi ganda.

$$ds = \rho d\theta \quad (3.31)$$

dimana  $\rho$  adalah jari-jari kurva sepanjang busur  $ds$ . Karena kurva elastis sangat datar,  $ds$  pada prakteknya sama dengan  $dx$ , sehingga:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \approx \frac{d\theta}{dx} \quad (3.32)$$

atau

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2}$$

Dari rumus lentur secara umum yaitu:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (3.33)$$

maka:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.34)$$

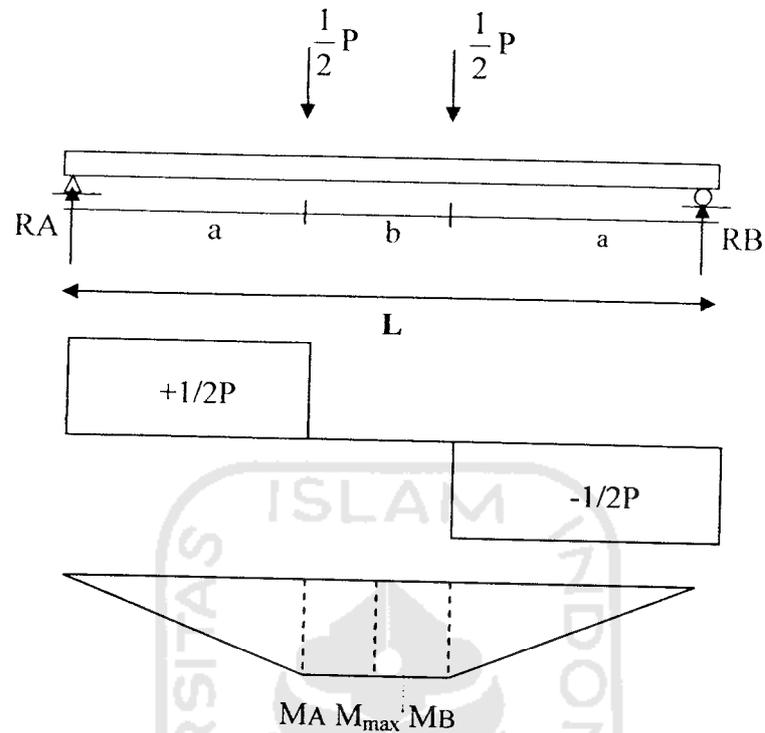
Dari Persamaan 3.34 kemudian diintegalkan, sehingga:

$$EI \frac{d y}{dx} = \int M dx + C_1 \quad (3.35)$$

Persamaan 3.33 adalah persamaan kemiringan yang menunjukkan kemiringan.  $M$  menyatakan momen yang dalam terminologi  $x$  dan  $C_1$  adalah lonstanta kondisi pembebanan tertentu. Untuk mendapatkan persamaan lendutan maka Persamaan 3.35 dintegralkan, sehingga:

$$EI y = \int \int M dx dx + C_1 x + C_2 \quad (3.36)$$

Menurut Dipohusodo (1996), Lendutan komponen struktur merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan dan kondisi ujung (bentang sederhana, menerus atau jepit), jenis beban (terpusat, merata) dan kekakuan lentur komponen (EI)



**Gambar 3. 17** Reaksi dan momen pada tampang memanjang balok

Gambar 3.17 menggambarkan momen yang terjadi dengan menganggap beban dari balok relatif kecil maka beban balok tidak tidak diperhitungkan.

$$R_A = \frac{(1/2P \cdot (b+a)) + (1/2P \cdot a)}{a+b+a} \quad (3.37)$$

$$R_A = R_B \quad (3.38)$$

$$M_{\max} = M_A = M_B \quad (3.39)$$

$$M_A = \frac{1}{2}P \times a \quad (3.40)$$

Lendutan ditengah bentang akibat beban titik :

$$\Delta = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.41)$$

Lendutan pada jarak  $x < a$  dari tepi balok:

$$\Delta = \frac{Px}{6EI} (3La - 3a^2 - x^2) \quad (3.42)$$

dimana:

$$E = 4700 \times \sqrt{f'c} \text{ (MPa)} \quad (3.43)$$

Momen Inersia dihitung dengan persamaan berikut:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.44)$$

### 3.7 Daktilitas balok

Dari data beban dan lendutan kemudian bisa dianalisa daktilitas dan kelengkungannya. Daktilitas pada hakekatnya adalah perbandingan antara simpangan maksimum dengan simpangan pada saat luluh awal pada komponen struktur yang ditinjau (Dipohusodo, 1991). Daktilitas dihitung menurut Persamaan 3.45 berikut:

$$D = \frac{\Phi u}{\Phi y} \quad (3.45)$$

Dengan,  $D$  = Daktilitas kelengkungan balok

$\Phi u$  = Kelengkungan balok saat beban ultimit (1/m).

$\Phi y$  = Kelengkungan balok saat beban luluh pertama (1/m)

Daktilitas pada balok dapat juga dicari dari lendutan yang terjadi yang merupakan simpangan saat lendutan ultimit dan pada saat leleh pertama, seperti dijabarkan dalam Persamaan 3.46 berikut

$$D = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3.46)$$

Dengan,  $D$  = Daktilitas simpangan balok

$\Delta u$  = Lendutan balok saat beban ultimit (1/m).

$\Delta y$  = Lendutan balok saat beban luluh pertama (1/m)

### 3.8 Kekakuan Balok

Kekakuan adalah gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit deformasi, semakin kaku suatu elemen struktur maka semakin besar sudut kemiringannya (Dipohusodo, 1991). Kekakuan pada balok biasa ditinjau dari hubungan beban dengan lendutan.

$$k = \frac{Py}{\Delta y} \quad (3.47)$$

Dengan,  $k$  = Kekakuan balok

$Py$  = Beban luluh pertama (kN).

$\Delta y$  = Lendutan balok saat beban luluh pertama (mm)

### 3.9 Momen – Kelengkungan Kondisi Retak ( $M_{cr}$ , $\kappa_{cr}$ )

Menurut Wang dan Salmon (1992) momen retak untuk balok normal ( $M_{cr}$ ) dimana terjadinya retak yang pertama kali dihitung menurut Persamaan 3.48:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (3.48)$$

Dengan,  $f_r$  = modulus retak beton, untuk beton mutu normal  $f_r = 0,7 \sqrt{f'_c}$

$y_t$  = jarak dari garis netral penampang utuh (mengabaikan tulangan baja) keserat tepi tertarik,

$I_g$  = momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat

penampang, untuk penampang segiempat,  $I_g = \frac{1}{12} b h^3$ .

Untuk mendapatkan kelengkungan saat kondisi retak untuk balok normal ( $\kappa_{cr}$ ) digunakan pendekatan menurut persamaan (3.49) yang diberikan Warner dkk (1998).

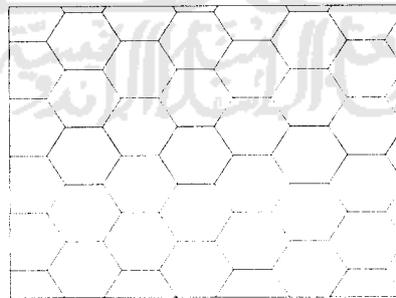
$$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr}}{E_c I_g} \quad (3.49)$$

dengan:  $E_c$  adalah modulus elastisitas beton =  $4700 \sqrt{f'_c}$

### 3.10 Kawat Strimin

Abdullah (2000) menyebutkan bahwa ferrosemen merupakan salah satu jenis beton bertulang tetapi tebalnya hanya sekitar 10 - 40 mm. Perbedaannya dari beton bertulang yang sudah umum dikenal adalah jika pada beton bertulang tulangan yang digunakan adalah batangan besi, pada ferrosemen sebagai tulangan digunakan jaringan kawat jala (*wiremesh*), misalnya jaringan kawat ayam.

Kegunaan kawat jala dan tulangan baja pertama-tama adalah sebagai pelupuh yang membentuk rangka dan menahan mortar pada saat basah. Pada keadaan setelah mengeras gunanya untuk menerima gaya tarik di mana mortar sendiri tidak bisa menerimanya. Sifat mekanika ferrosemen sangat tergantung pada tipe, jumlah, arah dan kekuatan daripada kawat jala dan baja tulangan. Beberapa tipe utama kawat jala dapat diterangkan di bawah :



**Gambar 3.18** Kawat Jala *heksagonal* (kawat ayam)

Kawat seperti pada Gambar 3.18 lebih populer digunakan, dan mudah didapat dipasaran negara-negara berkembang. Dikenal sebagai kawat ayam, murah dan mudah dikerjakan. Kawat jala ini dibuat dari kawat halus ke dalam bentuk *heksagonal*. Kawat yang digunakan dalam Ferrosemen biasanya bergaris tengah 1/48 in sampai 1/24 in (0,5 mm sampai 1,5 mm), dan jarak bukaan antara kawat antara 0,4 in sampai 1 in (10 mm sampai 25 mm). Dapat digalvanisir

sebelum ataupun sesudah dianyam. Kawat yang tidak digalvanisir juga digunakan tetapi masalah karat yang timbul ketika ditempatkan pada tempat terbuka menyebabkan pengurangan kekuatannya



**Gambar 3.19** Kawat Jala Bentuk *Diamond*

Kawat jala ini (gambar 3.19) lebih dikenal sebagai *expanded metal mesh*. Yang dibuat dari plat baja yang tipis dikembangkan untuk mendapat bukaan yang berbentuk wajik (*diamond shape*). Tidak sekuat kawat persegi ataupun heksagonal. Salah satu kelemahannya adalah timbulnya kecenderungan untuk lepas dari mortar akibat efek "gunting" dari bentuk wajik tersebut saat terbuka menyebabkan pengurangan kekuatannya. Kawat ini tidak menggunakan teknik las pada sambungannya akan tetapi dikaitkan satu sama lain. Pada penelitian kali ini jenis wiremesh yang digunakan adalah bentuk wajik. Bentuk wajik ini mudah didapatkan di pasaran disamping harganya yang terjangkau.