

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Dasar Struktur Beton Bertulang

Beton dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus/agregat kasar, kadang-kadang diberi campuran tambahan lainnya. Campuran yang masih plastis ini dicor ke dalam acuan dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen dengan air yang menyebabkan pengerasan beton. Bahan yang terbentuk ini mempunyai kuat tekan yang tinggi dan ketahanan tarik yang rendah. Oleh karena itu penguatan tarik dan geser harus diberikan pada daerah tarik pada penampang balok, hal ini dilakukan agar beton dapat digunakan untuk komponen struktur yang terdapat gaya tarik dan tekan secara bersamaan. (Tjokrodimulyo, 1992).

2.1.2. Material Pembentuk Beton.

1. Semen *Portland*

Semen adalah bahan hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang 70% - 80% terdiri dari Trikalsium silikat (3 CaO SiO_2) dan Dikalsium silikat (2 CaO SiO_2) yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan. Semen yang terutama terdiri dari senyawa kapur, silika dan aluminat,

dapat membentuk pasta ketika dicampurkan sejumlah air, dan menjadi bahan pengikat dari agregat dalam campuran beton. (Supartono, 1992).

2. Agregat

Beton, umumnya mengandung 65% - 80% agregat (agregat halus dan kasar), yang digunakan sebagai bahan pengisi. Karena itu untuk mendapatkan beton yang baik, diperlukan agregat yang berkualitas baik (dengan pembagian ukuran butiran yang baik pula), sehingga dapat memberikan stabilitas volume dan keawetan yang lebih tinggi, sebagai beton berkekuatan tinggi (Supartono, 1992). Maksud penggunaan bahan batuan (agregat) adalah :

- a. penghematan dari penggunaan semen *portland*,
- b. menghasilkan kekuatan yang besar pada betonnya,
- c. mengurangi susut pengerasan pada betonnya,
- d. mencapai susunan pampat beton dengan gradasi (variasi besar) yang baik dari bahan bantuannya, mengontrol *workability* (sifat mudah dikerjakan) adukan beton plastis dengan gradasi yang baik.

3. Air

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting dan diperlukan untuk bereaksi dengan semen, serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar mudah dipadatkan dan dikerjakan. Hal yang penting dalam pemilihan air antara lain kejernihannya dan air tidak mengandung bahan-bahan perusak (fosfat, asam alkali, minyak/bahan-bahan organis atau garam). Air yang

dipakai pada penelitian ini sebaiknya merupakan air tawar yang dapat diminum (Supartono, 1992).

4. *Superplasticizer*

Superplastisizer atau *high range water reducer* dalam hal ini mutlak diperlukan karena kondisi *w/c* yang umumnya sangat rendah pada beton mutu tinggi, untuk dapat mengontrol dan menghasilkan nilai *slump* yang optimal pada beton segar (*workable*), sehingga bisa menghasilkan kinerja pengecoran beton yang baik. Namun dalam segala hal, penggunaan *superplasticizer* perlu sesuai dengan standar ASTM – C . 494 – 81 Tipe F (Supartono, 1998).

5. *Silica fume*

Silica fume merupakan produk sampingan sebagai abu pembakar dari proses pembuatan *silicon metal* atau *silicon alloy* dalam tungku pembakaran listrik. *Silica fume* ini juga bersifat pozzolan, dengan kadar kandungan senyawa silika-dioksida (SiO_2) yang sangat tinggi (> 90 %), dan ukuran butiran partikel yang sangat halus, yaitu sekitar $\frac{1}{100}$ ukuran rata-rata partikel semen. Sebagai pengganti semen pemakaian *silica fume* dapat menghasilkan beton mutu tinggi. *Silica fume* dapat dipakai dalam dua cara, yaitu:

- a. digunakan sebagai *additive* dalam jumlah yang kecil untuk mendapatkan beton yang berkualitas.
- b. digunakan sebagai pengganti semen (sebesar 5%-15%) untuk mendapatkan beton mutu tinggi (Gideon Hadi Kusuma, 1992).

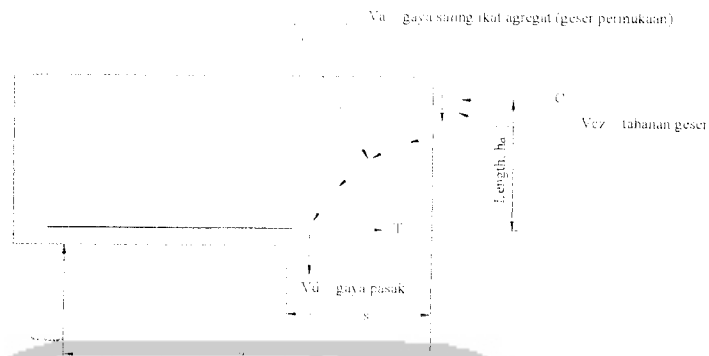
2.1.3. Perilaku Geser Pada Pembebanan

Balok beton murni tanpa tulangan sangat kecil ketahanannya terhadap gaya geser dan lentur, dibandingkan kekuatan tekannya. Sebagai akibatnya, balok tersebut mengalami kegagalan pada sisi tariknya pada beban yang rendah, jauh sebelum kekuatan beton pada sisi tekan dapat dimanfaatkan sepenuhnya.

Pada balok bertulang, geser yang disebabkan oleh gaya lintang terutama sekali dipikul oleh penulangan longitudinal selain oleh tulangan geser, sedangkan beton biasanya hanya dapat menahan tekan yang terjadi. Kombinasi komposit dari kedua material itu dapat berfungsi dengan baik dan bisa dicegah bila terjadi slip atau tergelincir beton dari tulangan (Nilson, 1993).

Transfer dari geser di dalam unsur-unsur beton bertulang terjadi dengan suatu kombinasi dari antara beberapa mekanisme sebagai berikut, seperti yang diperlihatkan di dalam gambar 2.1.

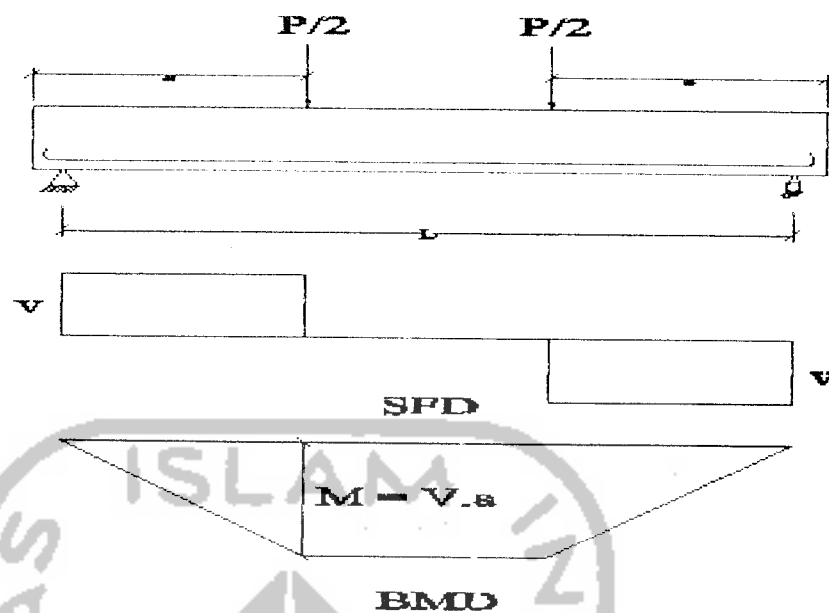
1. perlawanan geser dari beton yang belum retak, V_{cz} .
2. gaya ikat (*interlock*) antara agregat (transfer geser antara permukaan) V_a dalam arah tangensial sepanjang suatu retak yang serupa dengan gaya gesek akibat saling ikat yang tidak teratur dari agregat sepanjang permukaan yang kasar dari beton pada masing-masing pihak retak
3. aksi pasak (*dowel action*) V_d , sebagai perlawanan dari penulangan longitudinal terhadap gaya transversal.
4. aksi pelengkung (*arch action*) pada balok relatif tinggi,
5. perlawanan tulangan geser V_s , dari sengkang vertikal atau miring.



Gambar 2.1 Redistribusi perlawanan geser sesudah terbentuknya retak miring. Kemampuan dari suatu balok di dalam memikul tambahan beban setelah terbentuknya retak miring tergantung dari rapat tidaknya sebagian dari geser yang sebelumnya dipikul oleh beton yang retak, didistribusikan kembali melalui retak miring. Keberhasilan dari semua mekanisme 1 sampai 4 yang tersebut di atas dalam redistribusi geser, akan menentukan kapasitas geser dan derajat keseriusan dari pembentukan retak (Wang, Salmon, 1986).

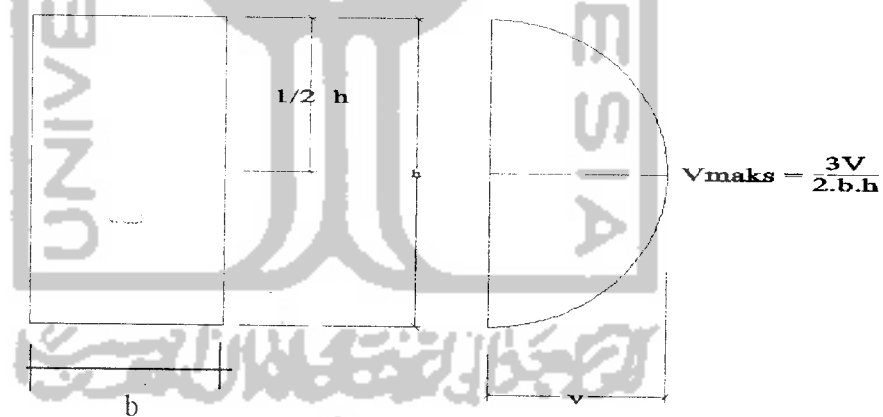
2.1.4. Analisa Tegangan Geser Pada Balok

Perencanaan balok beton bertulang terhadap gaya lintang ternyata sesuai dengan lentur murni. Beban ini dapat digambarkan gaya lintang yang menyatakan arah pergeseran yang cenderung terjadi pada balok. Untuk suatu balok sederhana yang dibebani dengan dua beban terpusat yang simetris, perbandingan M/V dapat dianggap sebagai daerah sejarak a yang mempunyai geser yang konstan. Jarak a dikenal sebagai bentang geser dan hal ini ditunjukkan pada gambar 2.2



Gambar 2.2. Diagram gaya lintang dan momen

Distribusi geser dapat digambarkan sebagai bentuk parabolis pada penampang seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.3. Distribusi tegangan geser

$$v = \frac{V \cdot s}{b \cdot I} \dots\dots\dots(2.1)$$

V = gaya lintang,

s = momen statis dari bagian tergeser terhadap garis netral,

b = lebar balok,

I = momen inersia tampang

Untuk penampang persegi nilai maksimal tegangan geser

$$V_{\text{maks}} = \frac{V \cdot s}{b \cdot I} = \frac{3V}{2 \cdot b \cdot h} \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan SKSNI T-15-1991-03 Bab 3.4. pasal 3.4.1.1 menetapkan bahwa gaya lintang yang bekerja pada penampang yang ditinjau harus direncanakan sehingga

$$V_u \leq \phi V_n \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan V_u adalah gaya lintang pada penampang yang ditinjau

Dengan memperhatikan faktor-faktor beban,

$$V_u = 1,2 V_d + 1,6 V_l \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan,

V_d = gaya lintang pada penampang akibat beban mati,

V_l = gaya lintang pada penampang akibat beban hidup.

Kekuatan geser nominal (V_n) yang dihitung adalah sebagai berikut :

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan ,

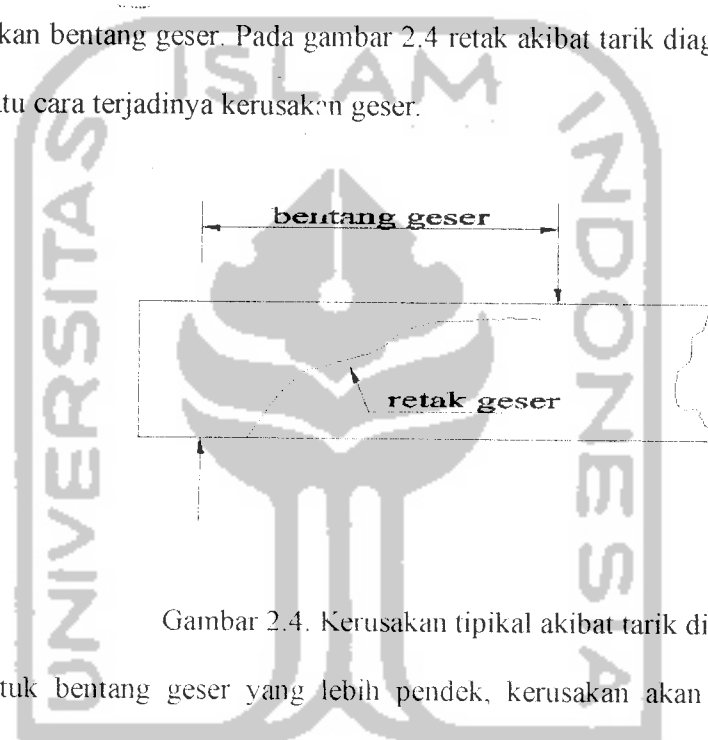
V_c = kekuatan geser nominal pada beton,

V_s = kekuatan geser nominal pada tulangan geser,

ϕ = faktor reduksi kekuatan.

2.1.5. Beberapa Jenis Retak pada Balok

Tegangan tarik dengan variasi besar dan kemiringan, baik sebagai akibat geser saja maupun gabungan dengan lentur, akan timbul disetiap tempat disepanjang balok, yang harus diperhitungkan pada analisis dan perencanaan. Pada balok beton tanpa tulangan, kerusakan akibat geser pada umumnya akan terjadi pada daerah sepanjang kurang lebih tiga kali tinggi efektif balok, dan dinamakan bentang geser. Pada gambar 2.4 retak akibat tarik diagonal merupakan salah satu cara terjadinya kerusakan geser.

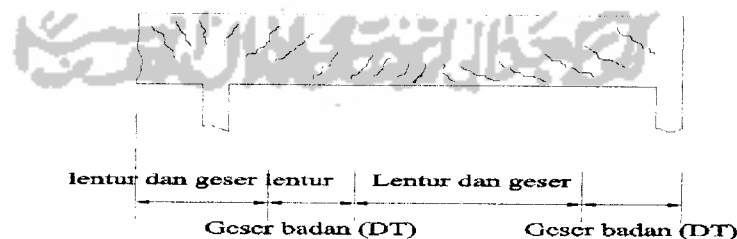


Gambar 2.4. Kerusakan tipikal akibat tarik diagonal

Untuk bentang geser yang lebih pendek, kerusakan akan timbul sebagai kombinasi dari pergeseran, remuk dan belah. Sedangkan untuk balok beton tanpa tulangan dengan bentang geser lebih panjang, retak karena tegangan tarik lentur akan terjadi lebih dahulu sebelum timbul retak karena tegangan tarik diagonal. Dengan demikian terjadinya retak tarik lenturan pada balok tanpa tulangan merupakan peringatan awal kerusakan geser.

Pada dasarnya, macam-macam retak dalam balok dibagi menjadi tiga jenis yang dijelaskan sebagai berikut ini (gambar 2.5)

1. retak lentur (*flexural crack*), terjadi didaerah yang mengalami momen yang besar, proses terjadinya retak lentur dimulai dari tepi balok tarik terus masuk merambat ke dalam balok dengan arah hampir vertikal ($\theta \cong 0$). Kecenderungan retak lentur terjadi pada balok yang semakin langsing.
2. retak geser lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada balok sebagai kelanjutan dari retak lentur, dan lebar atau panjang retak ini dikendalikan oleh adanya tulangan memanjang. Bila tegangan tarik diagonal pada daerah diatas retak ini melampaui kekuatan tarik beton, retak tersebut akan menjalar membelok ke arah diagonal. Retak jenis ini dapat dijumpai pada balok beton bertulang biasa dan prategang.
3. retak geser badan (*web shear crack*), adalah retak miring yang tanpa didahului oleh retak lentur, biasa terjadi pada daerah garis netral penampang dengan gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil ($\theta \cong 45^\circ$). Kejadian retak geser badan jarang dijumpai pada balok beton bertulang biasa, tetapi lebih sering dijumpai pada balok beton prategang berbentuk huruf I dengan badan tipis dan *flens* (sayap lebar).



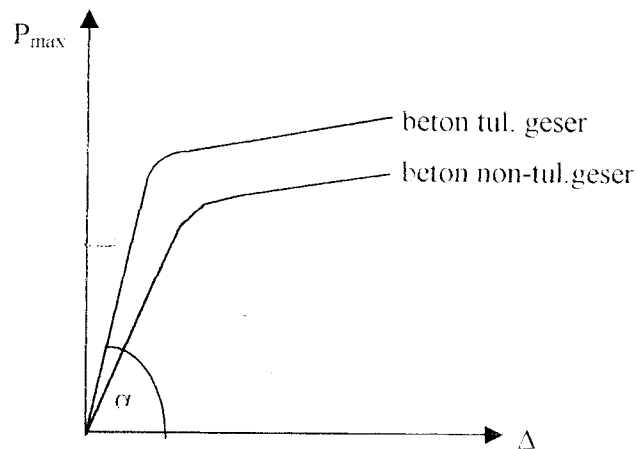
Gambar 2.5. Jenis retak pada balok beton bertulang (Nawy,1990)

Jadi, keretakan diagonal pada badan balok dapat berkembang sebelum terjadinya retak lentur (*flexural crack*) ataupun sebagai perpanjangan retak lentur yang telah ada. Jenis retak diagonal *web-shear cracks* terjadi pada titik yang tegangan gesernya melampaui kekuatan tarik beton, dan *flexural-shear cracks* timbul apabila kombinasi tegangan geser dan tegangan tarik melampaui kekuatan tarik beton. *Flexural-shear cracks* ini hampir selalu diawali dengan keretakan lentur (Standar Baru SNI T-15-1991-03).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pada beton mutu tinggi, bagian retak tarik diagonal lebih halus bila dibandingkan dengan beton normal. Pada beton mutu normal retak-retak biasanya berkembang pada ikatan (*interface*) antara agregat dengan pasta semen, kemudian berkembang melalui pasta kesegala arah. Sebaliknya retak pada beton mutu tinggi terjadi melalui agregat yang disebabkan oleh perbedaan kekuatan dan kekakuan relatif pasta terhadap batuan lebih kecil atau tidak mencukupi. (5th *international symposium on utilization of HSC HPC*, Paris, 1996).

2.1.6 Hubungan Beban dan Lendutan

Hubungan beban (P) dengan lendutan (Δ) diperoleh dari hasil uji pembebanan (*loading test*). Sesuai yang dilakukan Suhendro (1991) pemberian beban pada balok akan mengakibatkan penurunan (defleksi).



Gambar 2.6 Diagram hubungan antara beban (P) dan lendutan (Δ)

Dari hubungan antara kekuatan (P) dan lendutan (Δ) pada Gambar 2.6, maka diperoleh kekakuan balok (k), lihat persamaan :

$$k = tg\alpha = \frac{P}{\Delta} \quad (2.6)$$

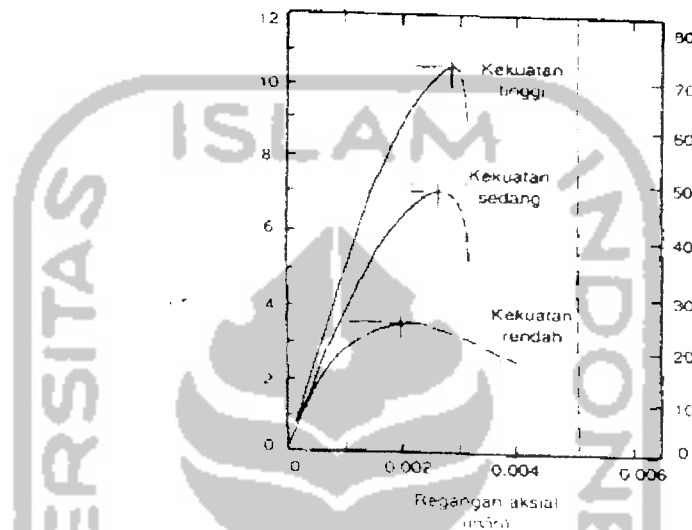
2.2. Landasan Teori

2.2.1. Umum

Kekuatan beton diukur dari keawetan dari sifat perubahan bentuknya, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor penentu antara lain kekuatan mortar, ikatan antara agregat dan mortar dan kekuatan agregat. Pada beton mutu tinggi, jumlah retak mikro ikatan lebih sedikit karena kompatibilitas kekuatan dan sifat elastis agregat dengan mortar lebih baik, serta makin tingginya kekuatan lekatan tarik (*tensile bondstrength*), juga kekuatan terhadap beban lebih tinggi dibandingkan pada beton normal.

Dengan mengamati kurva tegangan-regangan kuat beton pada Gambar 2.7. (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G-Editor, 1985), tampak karakteristik yang membedakan beton mutu lebih tinggi dari beton normal. Sudut awal kurva-E lebih

curam, bagian yang menarik dari kurva-E lebih linier, sudut dari bagian yang menurun kurva-E lebih curam dan batas regangan lebih rendah. Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 28 Mpa-83 Mpa (4.000 psi-12.000 psi), perbedaan tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan.



Gambar 2.7. kurva tegangan-regangan

Oleh karena itu, rumus modulus elastisitas untuk beton normal dipandang *overestimate* dan tidak memenuhi. Untuk beton mutu tinggi dengan kuat desak beton 41-83 Mpa, dianjurkan untuk menggunakan rumus (Standar baru SNI T-15-1991-03) sebagai berikut:

$$E_c = (3320\sqrt{f'_c} + 6900)(W_c / 2300)^{1.5} \text{ Mpa} \dots \dots \dots (2.7)$$

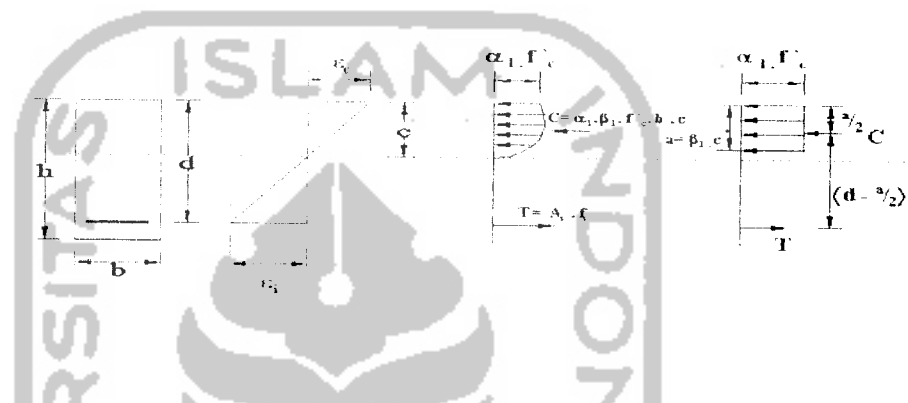
dengan E_c = modulus elastisitas beton tekan, dalam satuan N/mm^2

W_c = berat beton dalam satuan kg/m^3

f'_c = kuat tekan beton lebih dari 41 Mpa

2.2.2. Perencanaan Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi

Dalam analisis penampang balok disini, telah ditetapkan dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari lebar balok (b), tinggi efektif balok (d), tinggi total (h), kuat tekan beton (f_c'), kuat leleh baja (f_y), dan modulus elastisitas baja ($E_s = 2.10^5$ Mpa). Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Distribusi tegangan dan regangan internal beton bertulang

Untuk balok yang disebabkan oleh keruntuhan akibat melelehnya tegangan baja menunjukkan bahwa blok tegangan ekuivalen aman untuk digunakan bahkan untuk tegangan tekan diatas 83 Mpa atau 12.000 psi (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G-Editor, 1985). Karena itu dalam analisis lentur di sini, digunakan balok tegangan tekan ekuivalen sebagai dasar perhitungan kemampuan balok dalam menahan lentur.

Dari gambar 2.8. dan berdasarkan prinsip keseimbangan gaya-gaya horisontal, gaya tekan C dalam beton dan gaya tarik T dalam baja harus seimbang satu sama lain, yaitu: $C = T$, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\alpha_1 \beta_1 f_c' a b = A_s f_s \dots \dots \dots (2.8)$$

dengan :

α_1 = intensitas tegangan pada balok tegangan,

β_1 = rasio tinggi blok tegangan terhadap tinggi sumbu netral.

b = lebar balok,

h = tinggi total balok,

A_s = luas baja tarik,

f_s = tegangan dalam tarik baja

Akibat gaya tekan C dan gaya tarik T yang dipisahkan oleh lengan momen (d-a/2) seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.8. dihasilkan momen tahanan internal M sebagai berikut, bila terhadap gaya tarik:

$$M = T \cdot \left[d - \frac{a}{2} \right] \dots \dots \dots (2.9)$$

dan jika ditinjau terhadap gaya tekan beton:

$$M = C \cdot \left[d - \frac{a}{2} \right] \dots \dots \dots (2.10)$$

Analisis penampang persegi bertulangan tarik terhadap tulangan lentur

- 1. Tegangan yang terjadi pada baja tulangan (f_s), sama dengan tegangan luluh baja (f_y), sehingga gaya tarik dalam balok:

$$T = A_s \cdot f_s \dots \dots \dots (2.11)$$

Dengan luas baja tarik sebagai berikut :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan : ρ = rasio penulangan

d = tinggi efektif balok

2. Pembatasan penulangan tarik

Berdasarkan persamaan (2.12) diperoleh rasio tulangan tarik

$$\rho = \frac{As}{b.d} \dots \dots \dots (2.13)$$

untuk menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba-tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa ulangan, maka diperlukan batas minimum tulangan, yaitu:

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \dots \dots \dots (2.14)$$

sehingga dipenuhi persyaratan:

$$\rho \geq \rho_{min}$$

Rasio baja minimum tersebut yang tersebut yang termasuk dalam peraturan AC 1989, konservatif untuk balok-balok beton bertulang persegi empat pada semua tingkat kekuatan, kecuali untuk beton dengan mutu sangat tinggi dimana $f_c > 100$ Mpa. Menurut Nilson, untuk menjamin pola keruntuhan daktail di dalam lentur, maka peraturan ACI menetapkan batasan ρ maksimum adalah sebagai berikut

$$\rho_{min} = 0,75 \cdot \alpha \cdot \beta_1 \left[\frac{f_c}{f_y} \left[\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_s} \right] \right] \dots \dots \dots (2.15)$$

Pada blok tegangan dalam gambar 2.8 nilai rasio tinggi balok tegangan terhadap sumbu netral β_1 , untuk beton mutu tinggi berbeda dibandingkan dengan beton normal seperti yang terdapat dalam peraturan ACI (Ibrahim, H-H dan Mac Gregor, J.G, 1997).

Pada beton normal, nilai β_1 adalah sebagai berikut

$$0,65 \leq \beta_1 \leq 0,85 \dots \dots \dots (2.16)$$

nilai β_1 pada persamaan diatas tidak konservatif untuk dipakai dalam perhitungan balok beton mutu tinggi. Beberapa percobaan yang dilakukan oleh Cusson dan Pault, memberikan hasil yang lebih rendah dari nilai tersebut. Pada prinsipnya β_1 cenderung lebih rendah dengan meningkatnya kekuatan beton. Adapun nilai β_1 untuk beton mutu tinggi sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0,95 - \frac{f_c'}{400} \geq 0,70 \dots \dots \dots (2.17)$$

f_c' dalam Mpa

Demikian halnya dengan parameter yang menunjukkan intensitas tegangan pada blok tegangan α_1 . Untuk beton normal biasanya 0,85; pada beton mutu tinggi nilainya menjadi lebih rendah yaitu :

$$\alpha_1 = 0,85 - \frac{f_c'}{800} \geq 0,70 \dots \dots \dots (2.18)$$

f_c' dalam Mpa

Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 4000 psi-12000psi (28 Mpa-83 Mpa), perbedaannya tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan, sedangkan untuk menentukan nilai regangan luluh baja ϵ_y diperoleh :

$$\epsilon_s = \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (2.19)$$

1. Menentukan tinggi balok tegangan tekan

Tinggi balok tegangan tekan dapat diperoleh berdasarkan keseimbangan gaya internal balok persamaan (2.8) sebagai berikut :

$$A_s \cdot f_y = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot b \cdot c$$

Dengan $a = \beta_1 \cdot C$, maka

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot b} \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan:

a = tinggi balok tegangan tekan

2. Menghitung kuat lentur nominal

Kuat lentur nominal balok beton bertulang persegi empat dengan mutu tinggi dapat dihitung dengan persamaan biasa:

$$M_n = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (2.21)$$

dengan $\left(d - \frac{a}{2} \right)$ = lengan momen internal, yaitu jarak antara resultan gaya tekan beton dengan gaya tarik ditulangan.

Persamaan diatas dapat dinyatakan juga dengan persamaan sebagai berikut :

$$M_n = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left[1 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_c'} \right) \right] \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan $\frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_c'} = m$, maka:

$$M_n = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left(1 - \frac{1}{2} \rho \cdot m \right) \dots \dots \dots (2.23)$$

dan koefisien lawan :

$$k = \frac{M_n}{b.d^2} = \rho \cdot f_y \left(1 - \frac{1}{2} \rho \cdot m \right) \dots \dots \dots (2.24)$$

atau

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot k}{f_y}} \right) \dots \dots \dots (2.25)$$

Persyaratan kekuatan untuk lentur dapat dinyatakan berikut ini :

$$\emptyset M_n > \mu$$

dengan : μ = momen akibat beban berfaktor,

\emptyset = faktor reduksi kekuatan.

Bila suatu penampang persegi dengan ukuran yang telah ditetapkan, diperlukan mempunyai kekuatan yang lebih besar dari kekuatan yang tersedia dengan hanya menggunakan tulangan tarik saja (tulangan sebelah). Diperlukan tambahan tulangan tarik dan pemberian tulangan tekan. Dalam distribusi diagram tegangan pada balok bertulangan rangkap, tegangan internalnya dapat dianggap menjadi tiga bagian, yaitu:

1. pada arah tekan beton : $C_c = \alpha_1 \cdot f_c' \cdot a \cdot b$

2. pada daerah tekan baja tulangan: $C_s = A_s' \cdot f_y$

3. pada daerah tarik baja tulangan: $T = A_s \cdot f_y$

Prosedur untuk perencanaan penampang persegi dengan tulangan rangkap : berdasarkan keseimbangan horisontal gaya internal

$C_c + C_s = T$, dihasilkan persamaan:

$$\alpha_1 \cdot f_c' \cdot a \cdot b + A_s' \cdot f_y = A_s \cdot f_y \dots \dots \dots (2.26)$$

dengan tinggi blok tegangan adalah:

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{\alpha_1 f_c' b} \dots \dots \dots (2.27)$$

1. Momen ketahanan nominal penampang adalah:

$$Mn = \alpha_1 f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \dots \dots \dots (2.28)$$

atau dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$Mn = (A_s - A_s') f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \dots \dots \dots (2.29)$$

2. Bila tegangan dalam persamaan $\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c}$ dan $\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c}$

tidak dipenuhi, mungkin tegangan tulangan tekan ataupun tulangan tarik tidak mencapai tegangan leleh materialnya, sehingga persamaan tersebut tidak berlaku lagi. Untuk dapat menentukan momen ketahanan penampang, tegangan aktual harus dihitung, yang dapat dilakukan dengan persamaan:

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a}$$

selanjutnya diperoleh:

$$f_s' = \epsilon_s' E_s = 0,003 E_s \left(\frac{a - \beta_1 d'}{a} \right) \dots \dots \dots (2.30)$$

3. Melalui substitusi nilai ρ dari persamaan (2.27) dan dibagi (bd), persamaan

diatas dapat dirumuskan menjadi:

$$f_s' = 600 \left(1 - \frac{\beta_1 d' - a}{a} \right) \dots \dots \dots (2.31)$$

dan,

$$f_s = \epsilon_s' E_s = 0,003 E_s \left(\frac{\beta \cdot d - a}{a} \right) \dots \dots \dots (2.32)$$

dengan cara yang sama,

$$f_s = 600 \left(\frac{\beta \cdot d'}{a} - 1 \right) \dots \dots \dots (2.33)$$

dengan mensubstitusikan pers. (2.30) dan (2.32) kedalam pers. (2.26), diperoleh:

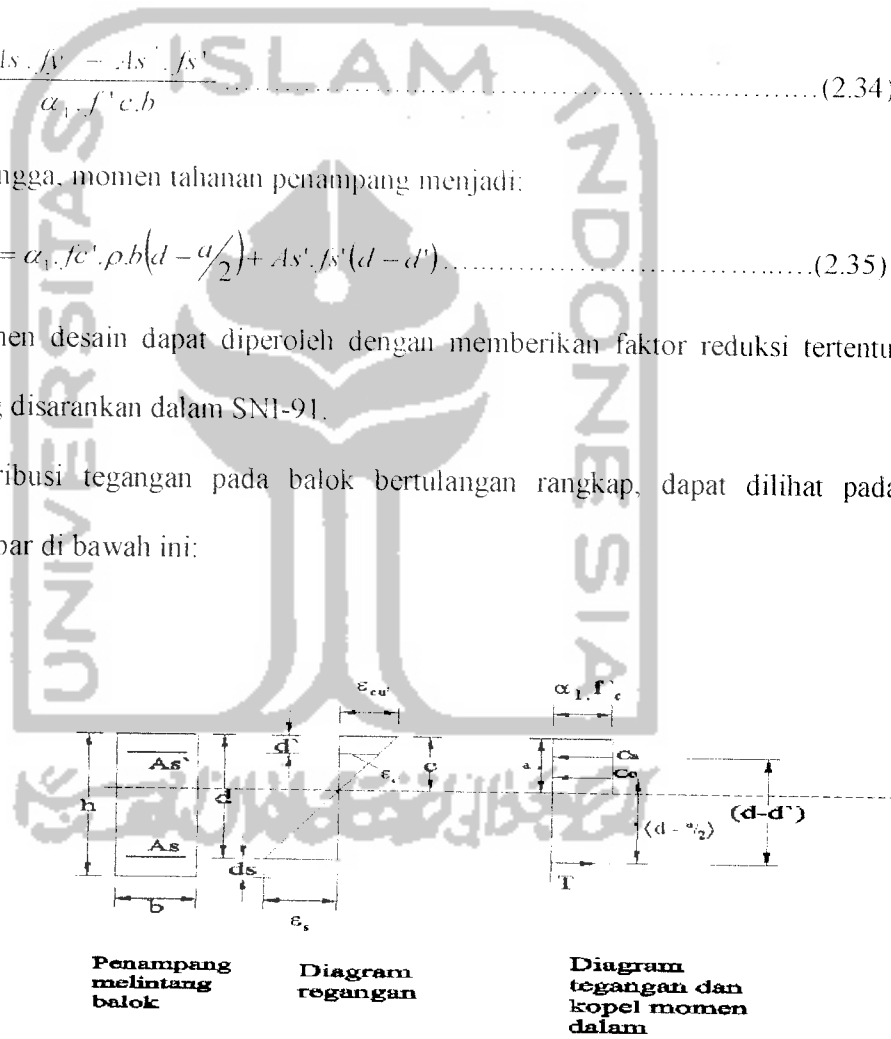
$$= \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_s'}{\alpha_1 \cdot f' \cdot c \cdot b} \dots \dots \dots (2.34)$$

sehingga, momen tahanan penampang menjadi:

$$M_n = \alpha_1 \cdot f' \cdot \rho \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' (d - d') \dots \dots \dots (2.35)$$

momen desain dapat diperoleh dengan memberikan faktor reduksi tertentu, yang disarankan dalam SN1-91.

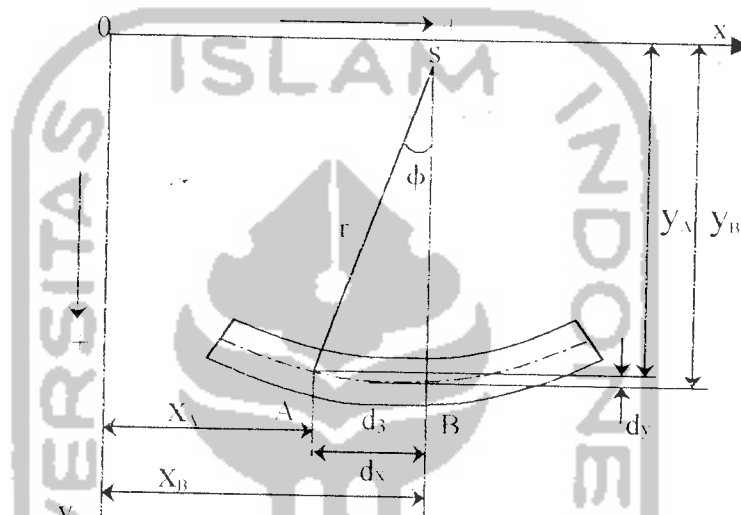
Distribusi tegangan pada balok bertulangan rangkap, dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.9. Distribusi tegangan dan regangan pada balok bertulangan rangkap.

2.2.3. Persamaan Differensial Untuk Defleksi

Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Menurut **Sumono (1982)**, sumbu-balok yang semula lurus, menjadi garis bengkok (melengkung) setelah balok menahan momen-lengkung. Garis-bengkok yang di-wujudkan oleh sumbu-balok itu dinamakan garis-elastis atau garis-lentur.



Gambar 2.10 Deformasi segmen balok dalam lenturan

Dari Gambar 2.10, kita dapat menyelidiki dua titik A dan B, sebagai berikut:

$$d_y = y_B - y_A$$

$$d_x = x_B - x_A$$

$$AB = d_s = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2} \dots\dots\dots(2.36)$$

Garis-garis normal yang ditarik dari titik-titik A dan B memotong di titik S sehingga $SA = r$ adalah radius bengkokan di A atau $\frac{1}{r} =$ derajat bengkokan di A.

Dari Gambar 2.10 dapat kita lihat bahwa:

$$AB = d_s = r \cdot d\phi \dots\dots\dots(2.37)$$

$$r = \frac{d_s}{d\phi} = \frac{d_s}{d\text{tg}\phi} \cdot \frac{d\text{tg}\phi}{d\phi} \dots\dots\dots(2.38)$$

untuk

$$\frac{d\text{tg}\phi}{d\phi} = \sec^2 \phi = 1 + \text{tg}^2 \phi = 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \dots\dots\dots(2.38a)$$

Jika persamaan (2.36) dan (2.38a) disubstitusikan ke persamaan (2.38), maka:

$$r = \frac{d_s \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2}}{d\text{tg}\phi \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}} \dots\dots\dots(2.39)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{d\text{tg}\phi}{d_s \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(2.40)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2_y}{d_x^2 \left\{ 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(2.41)$$

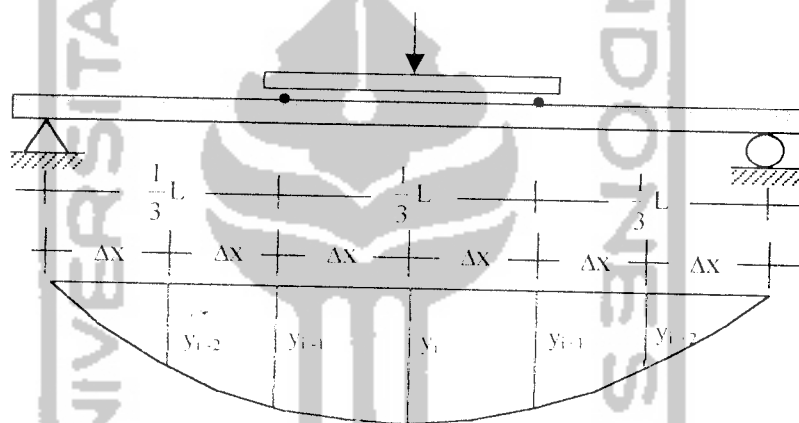
Karena ordinat-ordinat garis-elastis itu kecil sekali, maka $\frac{d_y}{d_x}$ juga amat kecil

nilainya terhadap satuan, sehingga $\frac{d^2_y}{d_x^2}$ boleh diabaikan terhadap 1. Jadi,

persamaan (3.41) atau disebut juga persamaan derajat bengkokan ditulis:

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2_y}{d_x^2} \dots\dots\dots(2.42)$$

dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik diskrit. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *central difference*.



Gambar 2.11. Defleksi balok

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \dots\dots\dots(2.43)$$

$$\frac{d^2_y}{d_x^2} = \frac{\frac{d_y}{d_x}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta x - \frac{d_y}{d_x}(2\Delta x)(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta x)^2} \dots\dots\dots(2.44)$$

Karena ΔY bernilai konstan maka, $\frac{dy}{dx}(2\Delta Y)(y_{i+1} - y_{i-1}) = 0$, sehingga persamaan (2.44) menjadi:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\frac{dy}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \dots\dots\dots(2.45)$$

Jika disubstitusikan persamaan (2.43) ke persamaan (2.45), maka persamaannya menjadi:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta Y} \right) \frac{(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \dots\dots\dots(2.46)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{(2\Delta Y)^2} \dots\dots\dots(2.47)$$

Menurut Thimoshenko, kelengkungan balok didekati dengan :

$$\phi = \frac{d^2 y}{dx^2} \dots\dots\dots(2.48)$$

Jadi, persamaan kelengkungan balok yaitu:

$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{(2\Delta Y)^2} \dots\dots\dots(2.49)$$

Mengacu pada Gambar 2.11, didapat momen (M):

$$M = \frac{1}{6} EI \dots\dots\dots(2.50)$$

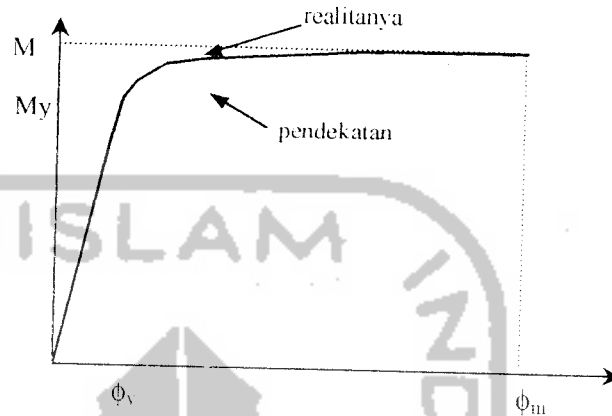
sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus:

$$EI = M/\phi \dots\dots\dots(2.51)$$

$$M = EI \cdot \phi \dots\dots\dots(2.52)$$

$$M = EI \frac{d^2\gamma}{dx^2} \dots \dots \dots (2.53)$$

Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ) ditunjukkan pada Gambar 2.12, Roufaiel dan Meyer (1983).



Gambar 2.12. Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (ϕ)

Setelah balok mengalami lendutan, nilai EI menjadi turun yang menyebabkan nilai M menjadi kecil, sehingga kekuatan ($P = \frac{6M}{L}$) menjadi berkurang. Perbaikan nilai EI akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok.

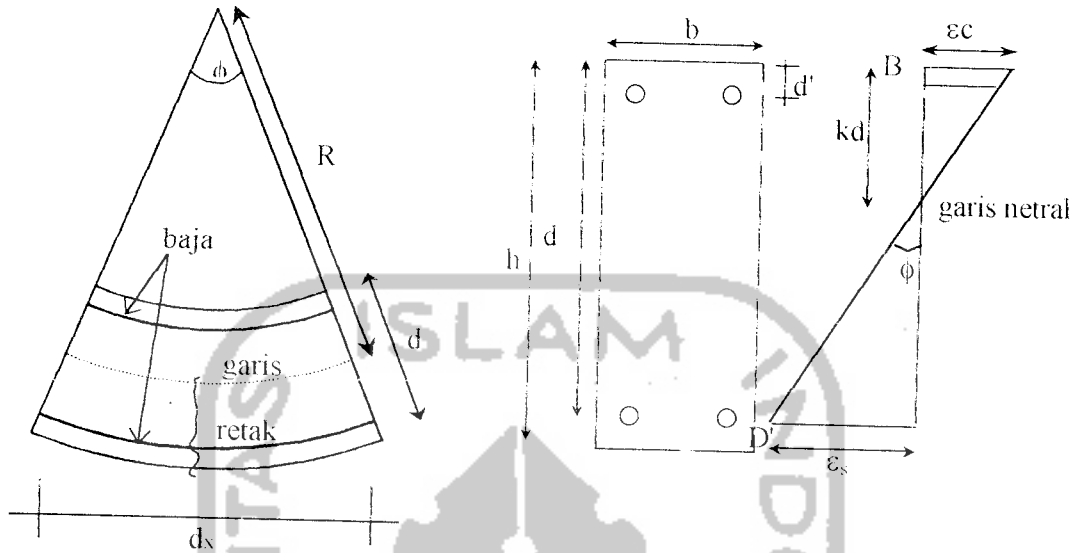
2.2.4. Momen-Kelengkungan Secara Teoritis

Perhitungan momen-kelengkungan secara teoritis menurut **Park and Pauley (1975)**, dinyatakan dalam tiga bagian yaitu:

1. Momen-Kelengkungan Retak Awal

Dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 2.13 jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Retak-retak pada beton akibat terjadi

penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (C), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s).



Gambar 2.13. Kelengkungan balok

Untuk menghitung momen retak awal pada sebuah balok beton bertulang digunakan rumus kuat lentur balok dengan menganggap bahan homogen (serba sama) dan elastik:

$$M_{crack} = \frac{f_r \cdot I}{y_{bawah}} \dots \dots \dots (2.54)$$

dengan: M_{crack} = momen retak awal

$$f_r = \text{modulus retak} = 0,8 \sqrt{f'_c}$$

I = inersia balok

y_{bawah} = jarak dari garis netral ke tepi bawah balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 2.13, maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen ditunjukkan dalam persamaan:

$$\frac{d_x}{R} = \frac{\epsilon_c \cdot d_c}{kd} = \frac{\epsilon_s \cdot d_s}{d(1-k)}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} + \frac{\epsilon_s}{d(1-k)}$$

dengan $1/R = \phi$, maka:

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd} + \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \tag{2.55}$$

dengan :

ϕ = kelengkungan

ϵ_c = regangan beton

ϵ_s = regangan baja

d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan (ϕ) adalah gradien regangan dari elemen seperti dalam Gambar 2.13. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen kecil, dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan persamaan 2.55 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari hitungan balok tulangan sebelah adalah lurus atau linear di awal, dan hubungan antara momen dan kelengkungan dalam persamaan:

$$EI = M.R = \frac{M}{\phi} \tag{2.56}$$

dengan EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton dapat mengurangi faktor kekakuan pada penampang. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah kurva linear $M-\phi$ di atas titik leleh baja. Ketika baja leleh, peningkatan yang besar terjadi di dalam kelengkungan pada momen hampir konstan.

Hubungan $M-\phi$ yang ideal adalah ditunjukkan pada grafik tri-linear. Garis awal pertama adalah retak awal, garis kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga adalah regangan ultimit dari beton. Untuk balok beton bertulang di bawah beban layan Hubungan $M-\phi$ dari beban 0 sampai leleh baja kedua garis hampir linier sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan $M-\phi$ dalam bentuk bi-linear.

2. Momen-kelengkungan setelah retak pada saat leleh pertama

Pada Gambar 2.13 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi tulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja ϕ_y dicari dengan persamaan 2.55 dalam istilah dari regangan baja saat leleh.

Momen-kelengkungan pada saat leleh pertama ditentukan dengan persamaan:

$$k = \left[(\rho - \rho')^2 n^2 + 2\left(\rho - \frac{\rho' d'}{d}\right) m \right]^{1/2} - (\rho - \rho') n \quad \dots\dots\dots(2.57)$$

$$M_y = A_s f_y j d + A_s' f_y \left(\frac{d'}{n} + kd - d' \right) \quad 0,85 f_y' \cdot 0,85 (h - kd) \cdot b \cdot j d' \quad \dots\dots\dots(2.58)$$

$$\phi_y = \frac{f_y E_s}{d(1-k)} \quad \dots\dots\dots(2.59)$$

Dengan: k = faktor tinggi garis netral

M_y = momen leleh pertama

ϕ_y = kelengkungan leleh pertama

A_s = luas tulangan tarik

A_s' = luas tulangan tekan

d = tinggi efektif penampang

d' = jarak dari serat tekan ketitik berat baja tekan

E_c = modulus elastis beton

E_s = modulus elastis baja

f_y = tegangan leleh baja

jd = lengan dari titik berat dari baja tekan dan beton ketitik berat tulangan tarik.

$n = E_s/E_c$; $\rho = A_s/bd$; $\rho' = A_s'/bd$

3. Momen-kelengkungan ultimit

Momen ultimit (M_u) dan kelengkungan ultimit (ϕ_u) dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 2.13) dalam persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots(2.60)$$

$$M_u = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot (d - a/2) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(2.61)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots\dots\dots(2.62)$$

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dicari dengan persamaan:

$$\epsilon_s = \epsilon_c \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \frac{\beta_1 \cdot d'}{a} \right) \dots\dots\dots(2.63)$$

substitusi persamaan (2.60) ke persamaan (2.63) menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika:

$$\epsilon_c [1 - \beta_1 \cdot d'] \left(\frac{0,85 \cdot f_c' \cdot b}{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y} \right) \geq \frac{f_y}{E_s} \dots \dots \dots (2.64)$$

Jika persamaan (2.64) kurang sesuai (baja tekan tidak leleh) maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan persamaan:

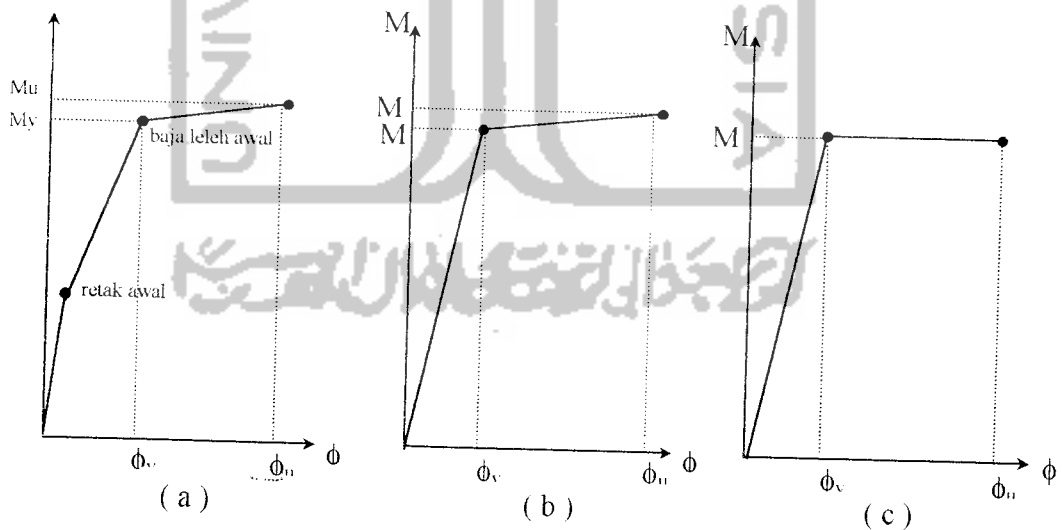
$$f_s' = \epsilon_s' \cdot E_s \dots \dots \dots (2.65)$$

maka momen ultimit dapat dicari dengan persamaan:

$$M_u = A_s \cdot f_y \cdot (d - kd) + 0,85 \cdot f_c' \cdot 0,85 \cdot b \cdot (h - kd)^2 \cdot 0,5 + 0,67 \cdot f_c' \cdot kd \cdot b \cdot \frac{5}{8} \cdot kd + A_s' \cdot f_y \cdot (kd - d') \dots \dots \dots (2.66)$$

dan kelengkungan ϕ_u dicari dengan persamaan (3.62).

Grafik momen kelengkungan untuk uji lentur ditunjukkan oleh Gambar (2.14)



Gambar 2.14. Kurva momer-kelengkungan ideal

Keterangan Gambar 2.14. :

- (a) Grafik trilinear momen kelengkungan
- (b) Grafik bilinear momen kelengkungan dengan peningkatan momen
- (c) Grafik bilinear momen kelengkungan tanpa peningkatan momen

2.2.5. Perencanaan Geser Balok

Beton mutu tinggi dengan kekuatan desak yang tinggi dan kesesuaian dalam kuat tarik beban, retakan geser yang terjadi lebih tinggi juga. Karena itu diperlukan jumlah tulangan geser minimum yang lebih banyak, serta jarak sengkang minimum juga harus dibatasi (Yoon, Y.S, Cook, W.D, dan Mitchell, D, 1996)

Perencanaan kekuatan geser menurut ACI adalah dengan meninjau kekuatan geser nominal V_n dari penjumlahan dua faktor kontribusi:

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots(2.67)$$

Dengan : V_n = kekuatan geser nominal

V_c = kekuatan geser dari balok beton,

V_s = kekuatan geser akibat penulangan geser.

Perencanaan kekuatan geser pada balok adalah sebagai berikut:

1. Desain untuk kuat geser balok tanpa tulangan badan.

Menghitung kuat geser dengan kombinasi geser dan lentur menurut SNI adalah :

$$V_c = 1/7 \left[\sqrt{f_c'} + 120 \rho \frac{V_u d}{M_u} \right] b.d \leq 0,30 \sqrt{f_c'} . b.d \dots\dots(2.68)$$

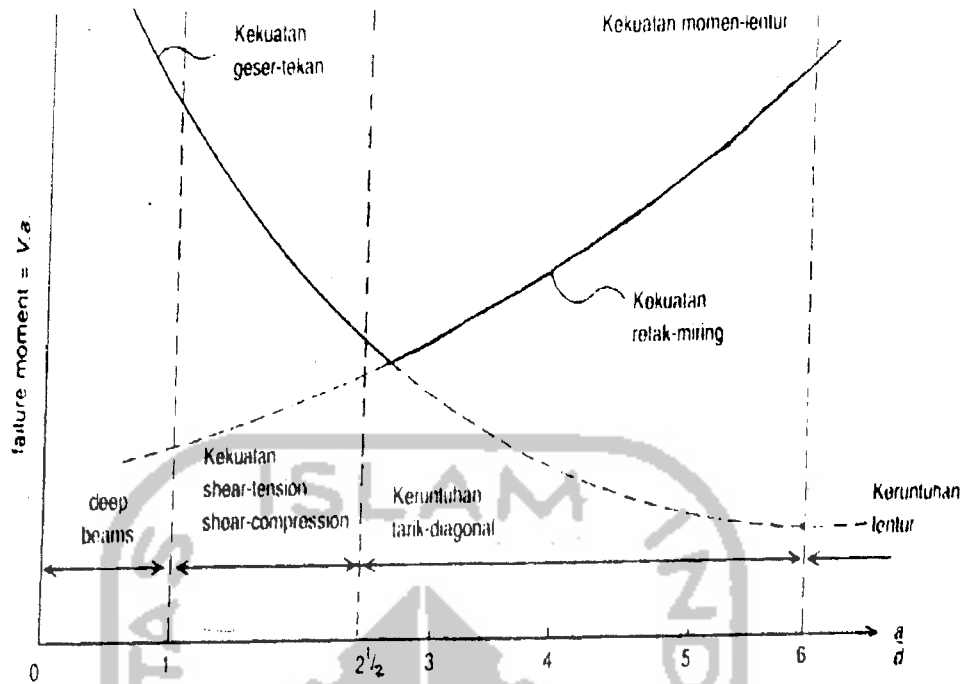
$$\text{dengan } \rho = \frac{A_s \cdot V_u d}{b \cdot d \cdot M_u} \leq 1,0$$

nilai ρ merupakan rasio tulangan longitudinal.

Dengan meningkatkan rasio ρ , yaitu memperbesar luas tulangan longitudinal, dapat meningkatkan kekuatan geser penampang. Rumus di atas umumnya dimanfaatkan untuk balok tinggi dan kondisi dengan adanya beban terpusat yang terletak didekat tumpuan. Faktor $\frac{V_u d}{M_u}$, juga berpengaruh terhadap geser lentur.

Bila a menyatakan rasio momen dibagi geser $\frac{M}{V}$, berdasarkan nilai rasio a/d atau $\frac{M}{Vd}$, keruntuhan geser dapat dibagi menjadi empat kategori (Wang dan Salmon, 1986):

- a. balok dengan $a/d < 1$ disebut balok tinggi,
- b. balok pendek dengan a/d sebesar 1 sampai $2\frac{1}{2}$, dengan kuat geser melampaui kapasitas retak miring,
- c. balok biasa dengan panjang menengah dan a/d dari $2\frac{1}{2}$ sampai 6, dengan kuat geser menyamai kapasitas retak miring,
- d. balok panjang dengan a/d yang lebih besar dari 6 dengan kuat lentur yang lebih kecil dari kuat gesernya.



Gambar 2.15 Variasi Kekuatan Geser

Dalam satuan SI kuat geser dengan kombinasi geser dan lentur menjadi:

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \dots \dots \dots (2.69)$$

2. Perumusan batas keruntuhan geser balok dengan tulangan badan

Diasumsikan bahwa semua sengkang leleh saat runtuh, maka geser yang ditahan oleh sengkang adalah:

Jika V_u melebihi ϕV_c , sengkang harus disediakan sebagai :

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{S} \dots \dots \dots (2.70)$$

$$V_u \leq \phi V_n \dots \dots \dots (2.71)$$

- Dengan V_u = gaya beban berfaktor,
- ϕ = faktor reduksi kekuatan,
- V_n = perlawanan geser nominal,

V_n yang diberikan oleh persamaan (2.71), dalam desain ini secara umum disusun dari bentuk:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \dots \dots \dots (2.72)$$

Dari persamaan (2.73) memberikan jarak sengkang :

$$S = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{\phi \cdot (V_u - V_c)} \dots \dots \dots (2.73)$$

3. Tulangan Badan Minimum

Kebutuhan tulangan badan minimum menurut ACI 318-83 M untuk satuan SI, adalah:

$$A_{v_{min}} = \frac{b \cdot S}{3 \cdot f_y} \quad (A_v \text{ dalam } mm^2) \dots \dots \dots (2.74)$$

Untuk geser yang ditahan oleh sengkang adalah:

$$V_{s_{min}} = \left(\frac{1}{3} Mpa \right) b \cdot d \dots \dots \dots (2.75)$$

maka dari persamaan diatas, diperlukan tulangan geser dengan jarak:

$$S = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_{s_{min}}} \dots \dots \dots (2.76)$$

2.2.6. Rencana campuran Beton Berkekuatan Tinggi

1. Rencana Umum

Secara Umum, kekuatan beton sangat tergantung pada rasio air-semen (w/c) yang umumnya diambil lebih rendah untuk beton berkekuatan tinggi daripada beton normal.

Disamping itu kekuatan beton juga sangat tergantung pada :

- a. jenis semen yang dipakai,
- b. ukuran maksimum agregat kasar.
- c. kualitas agregat, misalnya : gradasi, kekerasan, bentuk dan kebersihan agregat,
- d. jenis bahan tambah (*admixtures*)

2. Langkah -langkah pokok perencanaan campuran beton mutu tinggi, yaitu

- a. Menentukan slump dan kuat tekan rata – rata f'_{cr} , bila :

(1) berdasarkan data lapangan, f'_{cr} dipilih dari nilai terbesar dari :

$$f'_{cr} = f_c' + 1,34 \cdot S \dots\dots\dots(2.77)$$

$$f'_{cr} = 0,9 f_c' + 2,33 \cdot S \dots\dots\dots(2.78)$$

(2) berdasarkan data laboratorium

$$f'_{cr} = (f_c' + 27,6) / 0,90 \dots\dots\dots(2.79)$$

- b. Menentukan diameter butir agregat, tabel 2.2 ,
- c. Menentukan kandungan agregat kasar (kerikil) optimum, tabel 2.3,
- d. Estimasi air campuran dan kandungan udara (*air content*), tabel 2.5,
- e. Menentukan rasio air/perekat, $w / (c + p)$, dalam berat, tabel 2.6 dan

2.7. C = kandungan semen , P = *pozzolan*,

- f. Menghitung material P (*pozzolan*) yang diperlukan,

Nilai ini dapat dari membagi jumlah air (m^3) pada tahap 4, dengan rasio $w / (c + p)$, tabel 2.6 dan 2.7,

- g. Membuat proposi campuran dasar, tanpa bahan *cementious* P,

- h. Membuat proposi suatu campuran penyerta menggunakan bahan *pozzolan P*, misalnya : *silica fume*.
 - i. Membuat hasil campuran coba untuk setiap proposi campuran yang di desain dari langkah - langkah a sampai h,
 - j. Melakukan modifikasi proposi campuran untuk mencapai *slump* yang ditetapkan, dengan mengubah kandungan bahan, mengatur BPKA untuk beberapa campuran coba.
 - k. Menetapkan campuran yang optimum (campuran final)
3. Tabel perencanaan campuran beton mutu tinggi :

Tabel – 2.1 Kuat Tekan Desain (bila rekaman data tidak tersedia) untuk menentukan Nilai Deviasi Standar.

Kuat tekan spesifik f'_{cr} (Mpa)	Kuat tekan perlu f_c' (Mpa)
> 34,5	$F_c' + 9,7$

Tabel – 2.2 Ukuran maksimum diameter kerikil

Kuat beton yang Disyaratkan (Mpa)	Ukuran maksikum Agregat, kerikil (mm)
< 62	19 – 25
> 62	10 – 12,5

Tabel – 2.3 Fraksi volume kerikil sesuai ukuran maksimum nominal kerikil.

Ukuran maksimum Nominal (mm)	10	12.5	20	25
Volume fraksi dari kerikil kering oven kompak, ϕ vol	0,65	0,68	0,72	0,75

Tabel – 2.4 *Slump* yang disarankan

Dengan BPKA (mm)	Tanpa BPKA (mm)
25 – 50	50 – 100

Catatan : Atur *slump* dengan menambah / mengurangi BPKA (*plasticizer*) di lapangan

Tabel- 2.5. Jumlah air – campuran (kg/m^3 beton) yang diperlukan dan kandungan udara (*air content*) untuk beton segar yang menggunakan pasir dengan rasio rongga 35 % (kandungan air – coba tahap awal)

<i>Slump</i> (mm)	Air - pencampur (kg / m^3) untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
	10	12,5	20	25
25 – 50	183	174	168	165
50 – 75	189	183	174	171
75 – 100	195	189	180	177
Udara (terperangkap) %	2,5	2,0	1,5	1,0

Tabel – 2.6. Nilai rasio $w / (c + p)$ untuk beton tanpa BPKA (Bahan Pengurang Kandungan Air).

Kuat beton lapangan f'_{cr} (Mpa)		Rasio $w / (c + p)$ untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
		10	12,5	20	25
48	28 hari	0,42	0,41	0,40	0,39
48	56 hari	0,46	0,45	0,44	0,39
55	28 hari	0,35	0,34	0,33	0,33
55	56 hari	0,38	0,37	0,36	0,35
62	28 hari	0,30	0,29	0,29	0,28
62	56 hari	0,33	0,32	0,31	0,30
69	28 hari	0,26	0,26	0,25	0,25
69	56 hari	0,29	0,28	0,27	0,26

Catatan : $f'_{cr} = (f'_{c'} + 9,7) \text{ Mpa}$ Tabel - 1

Tabel – 2.7. Rasio $w / (c + p)$ untuk beton dengan BPKA / *plasticizer*

Kuat beton lapangan f'_{cr} (Mpa)		Rasio $w / (c + p)$ untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
		10	12,5	20	25
48	28 hari	0,50	0,48	0,45	0,43
48	56 hari	0,55	0,52	0,48	0,46
55	28 hari	0,44	0,42	0,40	0,38
55	56 hari	0,48	0,45	0,42	0,40
62	28 hari	0,38	0,36	0,35	0,34
62	56 hari	0,42	0,39	0,37	0,36
69	28 hari	0,33	0,32	0,31	0,30
69	56 hari	0,37	0,35	0,33	0,32
76	28 hari	0,30	0,29	0,27	0,27
76	56 hari	0,37	0,31	0,29	0,29
83	28 hari	0,27	0,26	0,25	0,25
83	56 hari	0,30	0,28	0,27	0,26

Catatan : $f'_{cr} = (f'_c + 9,7)$ Mpa

Tabel - 1.

Tabel – 2.8 Faktor modifikasi Deviasi Standar (D S) (Bila terdapat kurang dari 30 hasil uji) Lihat juga ACI – 318 Tabel 5.3.1.2.

Jumlah Hasil Uji	Faktor Modifikasi D S
<15	Gunakan Tabel 2.1.
15	1,16
20	1,08
25	1,03
>30	1,00

2.2.7. Pengujian Kuat Desak Beton

Kuat desak beton adalah kemampuan beton untuk menahan beban dibagi dengan luasan permukaan beton yang menerima beban tersebut. Pengujian benda uji dilakukan setelah sampai berumur 28 hari. Untuk

mendapatkan kuat desak beton tersebut dari masing-masing benda uji digunakan rumus :

$$\text{Kuat desak } f_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.80)$$

$$f_{cr} = \frac{\sum_{i=1}^N f_c}{N} \dots\dots\dots (2.81)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_c - f_{cr})^2}{N-1}} \dots\dots\dots (2.82)$$

$$m = k \cdot Sd \dots\dots\dots (2.83)$$

$$f_c' = f_{cr} - m \dots\dots\dots (2.84)$$

dengan :

P = beban maksimum (kN),

A = luas permukaan (cm^2),

f_c = kuat desak beton masing- masing benda uji (Mpa),

f_{cr} = kuat desak beton rata - rata (Mpa),

N = jumlah benda uji,

Sd = standar deviasi (Mpa),

m = nilai margin (Mpa),

k = konstanta (1,64),

f_c' = kuat desak karakteristik (Mpa)

2.2.8. Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar saat terjadinya luluh, dan beban maksimum baja tulangan, serta tegangan luluh baja yang terjadi.

$$f_y = \frac{P_{luluh}}{\text{luas bidang tarik}} \text{ (kg cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(2.85)$$

$$f_{y \text{ rata-rata}} = \frac{f_{v \ n-2} + f_{v \ n-1} + f_{v \ n}}{n} \text{ (kg cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(2.86)$$

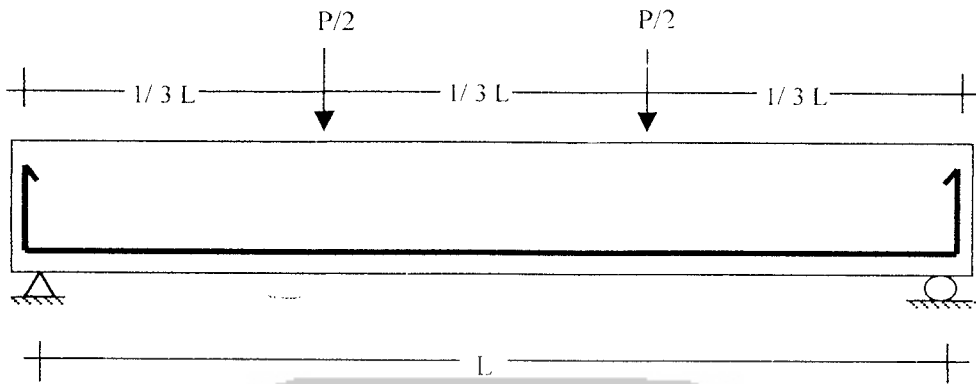
dengan :

f_y = tegangan luluh baja,

N = jumlah sampel baja tulangan

2.2.9. Pengujian Geser pada Balok.

Pengujian geser ini bertujuan untuk mengetahui atau mengamati lendutan yang terjadi sampai kekuatan pembebanan maksimal dan perilaku geser dari pola retak yang terjadi. Pada penelitian ini digunakan balok biasa dan diharapkan akan terjadi runtuh gesernya menyamai kekuatan retak miring, sehingga perbandingan bentangan geser (a) terhadap tinggi efektif balok-balok (d) berada di sekitar 2,5 sampai 6. Pendekatan untuk bentang geser digunakan jarak $\frac{1}{3}$ L dari tumpuan dengan dua titik pembebanan (*third point loads*).



Gambar 2.16. Letak titik pembebanan pengujian geser

