

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Beton dapat diperoleh dengan cara mencampurkan semen portland, air dan agregat dengan perbandingan tertentu, dalam teknologi beton dikenal jenis beton ringan ("*leightweight concrete*"). Beton ringan dibuat dengan 3 cara (Nevile, 1975) yaitu :

1. dengan memakai agregat ringan, misalnya kasar yang ringan, agregat halus yang ringan atau keduanya,
2. dengan membuat gelembung-gelembung udara, yaitu dengan pemakaian bahan tertentu yang menyebabkan terjadinya gelembung udara kecil didalam beton,
3. dengan cara tanpa memakai pasir (beton non pasir), sehingga banyak terdapat rongga diantara butir-butir agregat kasar.

Beton dengan memakai agregat pecahan genteng termasuk beton ringan karena berat jenisnya ringan tetapi memiliki kuat tekan yang tekan cukup tinggi.

Beton ringan mempunyai berat jenis dibawah 2 gr/cm^3 (beton biasa mempunyai berat jenis $2,4 \text{ gr/cm}^3$). Secara kasar beton ringan menurut berat jenisnya dibagi 3(tiga) kelompok (Nevile ,1975), yaitu :

1. beton ringan jenis antara 0,30 sampai 0,80 gr/cm³ yang biasanya dipakai sebagai bahan isolasi,
2. beton ringan dengan berat jenis antara 0,80 sampai 2,00 gr/cm³ yang dapat dipakai untuk struktur ringan dan,
3. beton ringan dengan berat jenis antara 1,40 sampai 2,00 gr/cm³ yang dapat untuk struktur sedang.

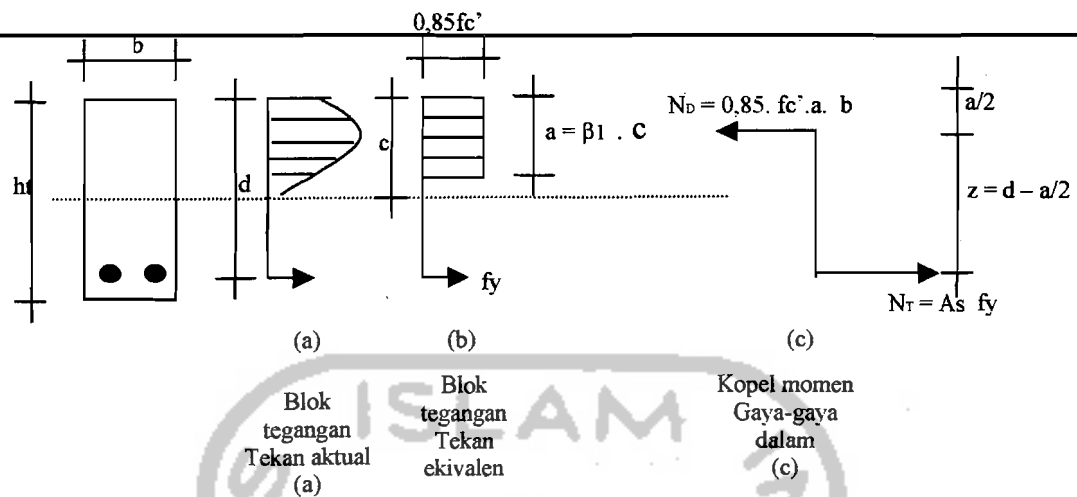
3.2 Beton Bertulang

Nilai kuat tekan beton relatif tinggi dibanding dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan sangat getas. Nilai kuat tariknya hanya berkisar 9%-15% dari kuat tekannya. Pada penggunaan komponen struktur bangunan, umumnya beton diperkuat dengan baja tulangan sebagai bahan yang dapat bekerja sama dan mampu menahan kelemahannya, terutama pada bagian yang dapat menahan 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 kerjasama seperti itu disebut sebagai beton bertulangan baja atau lazim disebut beton bertulang saja. Dalam perkembangannya didasarkan pada tujuan peningkatan kemampuan kekuatan komponen, sering dijumpai beton dan tulangan baja bersama-sama ditempatkan pada bagian struktur pada keduanya menahan gaya tekan. (Istimawan, 1994).

3.2.1 Kuat lentur balok persegi

Lentur pada balok merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar, apabila bebannya bertambah maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya retak lentur. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen. Taraf pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. Karena itulah perencana harus mendisain penampang balok sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak yang berlebihan pada saat beban bekerja, dan masih mempunyai keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami keruntuhan. (Edward G Nawy, 1990).

Kuat lentur suatu balok beton tersedia karena berlangsungnya mekanisme tegangan- regangan dalam yang timbul didalam balok yang pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam , seperti terlihat dalam gambar 3.1 N_D adalah gaya tekan dalam yang merupakan resultante seluruh gaya tekan pada daerah diatas gaya netral. Sedangkan N_T adalah resultante gaya tarik dalam, merupakan resultante seluruh gaya tarik yang diperhitungkan untuk daerah dibawah garis netral. Kedua gaya ini, arah garis kerjanya sejajar, sama besar, tetapi berlawanan arah dan dipisahkan dengan jarak z sehingga membentuk kopel momen tahan dalam dimana nilai maksimumnya disebut kuat lentur atau momen tahan penampang komponen struktur terlentur.



Gambar 3.1 Blok tegangan Ekuivalen Whitney. (Istimawan Dipohusodo, 1994)

3.2.2 Perilaku lentur pada pembebanan

Beton murni (tanpa tulangan) tidak efisien sebagai batang-batang lentur karena kekuatan tarik pada lentur adalah sangat kecil dibandingkan dengan kekuatannya. Sebagai akibatnya, beton tersebut mengalami kegagalan pada sisi tariknya pada pembebanan yang rendah, jauh sebelum kekuatan beton pada sisi tekan dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Berdasarkan hal ini, maka dipakai tulangan yang ditempatkan pada sisi tarik didekat serat paling luar, namun tulangan tersebut masih mendapat perlindungan yang cukup baik terhadap api dan karat. Pada balok beton bertulang, tarik yang disebabkan oleh momen lentur terutama sekali dipikul oleh tulangan, sedang beton biasanya hanya dapat memikul tekan yang terjadi. Aksi komposit dari dua material tersebut hanya dapat berjalan baik apabila bisa dicegah terjadinya slip antara beton dan tulangan. Hal ini bisa dicapai antara lain dengan

memakai tulangan ulir yang mempunyai daya lekat yang tinggi pada permukaan tulangan beton.

Apabila pembebanan pada balok tersebut ditambah secara berangsur-angsur mulai dari nol sampai mencapai suatu harga yang dapat menyebabkan hancurnya balok, maka dapat dibedakan dengan jelas adanya beberapa tingkat perilaku yang berbeda.

Pada pembebanan yang kecil, selama tegangan tarik maksimum beton lebih kecil dari modulus kehancuran, maka seluruh beton dapat dikatakan efektif dalam memikul tegangan, tekan pada satu sisi yang lain. Tulangan juga mengalami deformasi yang sama seperti beton dan mengalami tegangan tarik.

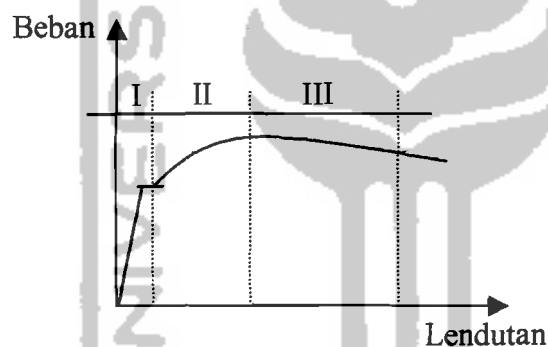
Apabila beban ditambah terus, maka kekuatan tarik beton akan segera tercapai, dan pada tingkatan ini mulai tampak retak-retak akibat tarik. Retak-retak ini akan menjalar cepat ke atas dan bergeser diikuti menjalarnya retak-retak. Retak-retak ini, cukup banyak mempengaruhi perilaku balok yang mengalami pembebanan. Sesungguhnya, pada suatu penampang retak, yaitu suatu penampang yang terletak pada tempat terjadinya retak, beton tidak menyalurkan tegangan-tegangan tarik, dengan demikian seperti juga batang-batang tarik maka tulanganlah yang harus memikul semua tarik yang terjadi.

Apabila dipakai jumlah tulangan yang relatif sedikit (Underreinforced) pada suatu besar pembebanan tertentu, tulangan akan mencapai tegangan leleh. Pada besar tegangan tersebut tulangan akan meleleh secara tiba-tiba dan akan mengalami deformasi yang besar, dan retak-retak akibat tarik pada beton akan melebar sehingga menjalar keatas, diikuti secara serentak dengan terjadinya lentur yang besar pada balok. Apabila

ini terjadi, regangan pada daerah tekan akan bertambah sedemikian rupa sehingga dapat menghancurkan beton, kehancuran tekan sekunder terjadi pada besar pembebanan yang sedikit lebih besar dari beban yang menyebabkan tulangan meleleh. Dengan demikian, secara efektif tercapainya tegangan leleh berlangsung secara berangsur-angsur dan didahului dengan tanda-tanda yang cukup jelas, seperti melebar dan memanjangnya retak, dan tanda-tanda yang menunjukkan besarnya lendutan yang terjadi.

3.2.3 Perilaku lendutan pada balok

Hubungan beban–lendutan pada balok yang dibebani lentur dapat disederhanakan menjadi bentuk trilinear (Nawy, 1990) seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Hubungan beban-lendutan pada balok yang dibebani lentur

Pada daerah I yaitu pada daerah praretak, balok masih bersifat elastis penuh, tegangan tarik maksimal yang terjadi pada beton masih lebih kecil dari kuat tarik lentur (f_{cr}) beton, kekakuan lentur EI balok masih mengikuti modulus elastisitas (E_c) beton dan momen inersia penampang beton bertulang tak retak.

Pada daerah II, yaitu taraf pasca retak, pada taraf ini balok telah mengalami retak-retak yang masih terkontrol baik distribusinya maupun lebarnya kekakuan lentur

telah berkurang sehingga kurva beban lendutan di daerah ini semakin landai dibandingkan daerah pra retak.

Pada daerah III atau daerah pasca layan, dimana tegangan pada daerah ini tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya, pada daerah ini diagram lendutan lebih landai daripada daerah-daerah sebelumnya. Hal ini karena semakin berkurangnya kekakuan lentur akibat bertambahnya jumlah dan lebar retak disepanjang bentang.

3.3. Perhitungan Momen Retak

Pada suatu penampang retak, yaitu suatu penampang yang terletak pada terjadinya retak, beton tidak menyalurkan tegangan-tegangan tarik, dengan demikian seperti juga pada batang-batang tarik maka tulanganlah yang harus memikul semua tegangan tarik yang terjadi.

Kekuatan tarik beton akan tercapai jika beban terus bertambah, pada tingkatan ini mulai terjadi retak-retak akibat tarik. Retak-retak ini akan menjalar cepat keatas dan bergeser mengikuti retak-retak sebelumnya.

Berdasarkan anggapan bahwa jumlah baja tertentu akan memberikan keadaan hancur yang tertentu pula (Istimawan,1994), maka pemakaian jumlah tulangan yang relatif sedikit pada suatu pembebanan tertentu, tulangan akan mencapai tegangan leleh. Pada besar tegangan tersebut tulangan akan meleleh secara tiba-tiba dan akan mengalami deformasi yang besar, dan retak-retak akibat tarik pada beton akan melebar keatas, diikuti dengan terjadinya lentur yang besar pada balok. Jika hal ini terjadi, regangan pada daerah tekan bertambah sedemikian rupa sehingga dapat menghancurkan beton.

Tegangan leleh dan besarnya lendutan berlangsung secara berangsur-angsur dan didahului dengan tanda-tanda yang cukup jelas, seperti melebar dan memanjangnya retak pada balok.

Sebaliknya jika digunakan jumlah tulangan banyak atau jumlah tulangan yang normal dari tulangan yang mempunyai kekuatan tinggi, maka kekuatan beton akan dicapai sebelum tulangan mulai meleleh. Regangan beton menjadi sangat besar sehingga dapat merusak keutuhan beton (Winter,1993).

Momen retak secara teoritis menurut Istimawan Dipohusodo dinyatakan dengan rumus sbb:

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I_g}{Y_t} \dots\dots\dots(3.1)$$

Dimana :

M_{cr} = Momen Retak

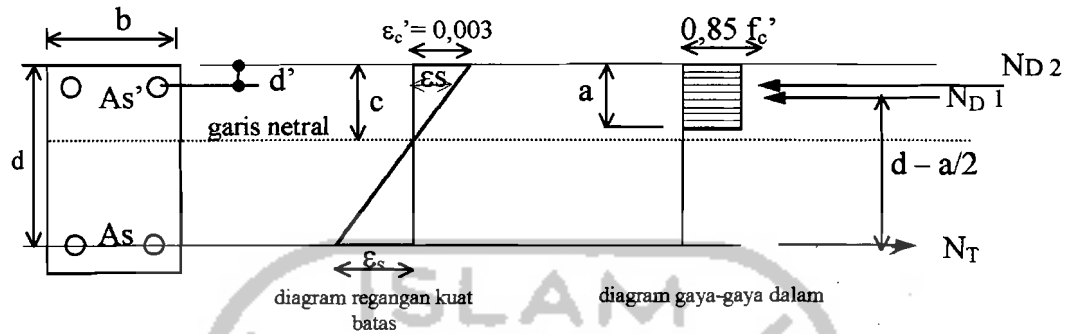
f_r = Modulus retak beton = $0,7 \times \sqrt{f_c'}$

I_g = Inersia balok = $\frac{1}{12} \times b \times h^3$

Y_t = Jarak garis netral ke serat tepi tertarik

3.4. Perhitungan Momen Kapasitas

Analisa balok tertentu bertulangan baja tarik dan baja tulangan tekan



Gambar 3.3 Blok Tegangan Ekuivalen Whitney Tulangan Rangkap

Mengacu pada Istimawan,1994 kapasitas momen balok beton bertulangan rangkap berdasarkan Gambar 3.3, mempunyai 2 kondisi :

1. Tulangan baja desak telah leleh :
 - I. Jika baja desak telah leleh, maka $f_s = f_s' = f_y$,
 - II. Tentukan letak garis netral $c = \frac{a}{\beta_1}$ (3.2)
 - III. Digunakan diagram regangan untuk memeriksa regangan tulangan baja tekan maupun tarik, ini untuk membuktikan anggapan pada langkah awal benar.

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c} (0,003) \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - c}{c} (0,003) \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

Anggapan baja desak telah leleh $\varepsilon_s' > \varepsilon_y$, maka

$$- (N_{D1}) = 0,85 f_c' a b$$

$$- (ND_2) = A_s f_y$$

$$IV. \quad \text{Dihitung pasangan kopel gaya tulangan tekan dan tarik } M_{n2} = A_s' f_y (d-d') \dots (3.5)$$

$$\text{hitung pasangan kopel gaya beton tekan dan baja tarik } M_{n1} = A_{s1} f_y (d-a/2) \dots (3.6)$$

$$\text{Maka } M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots (3.7)$$

$$V. \quad M_R = \Phi M_n \dots (3.8)$$

2. Tulangan baja desak belum leleh :

I. Jika baja desak telah leleh, maka $f_s = f_s'$

II. Digunakan persamaan pasangan kopel beton tekan dan baja tarik, sehingga $A_{s1} = A_s - A_s'$

III. Apabila $\epsilon_s' < \epsilon_y$, dicari nilai c dengan persamaan keseimbangan :

$$(0,85 f_c' b \beta_1) c^2 + (600 A_s' - A_s f_y) c - 600 d' A_s' = 0 \dots (3.9)$$

IV. Menghitung tegangan tulangan baja tekan

$$f_s' = \frac{c-d'}{c} (600) \dots (3.10)$$

V. Dapat dihitung nilai a dengan rumus

$$a = \beta_1 c \dots (3.11)$$

VI. Hitung gaya-gaya tekan

$$- ND_1 = (0,85 f_c') b a \dots (3.12)$$

$$- ND_2 = A_s' f_s' \dots (3.13)$$

Kemudian hitung gaya tarik

$$N_T = A_S f_y, \text{ dimana } N_T = N_{D1} + N_{D2} \dots\dots\dots (3.14)$$

Apabila nilai f_c' semakin kecil akan menyebabkan nilai N_{D1} akan menjadi lebih kecil, sehingga semakin kecil nilai N_{D1} akan menjadikan nilai N_T akan menjadi lebih kecil pula.

VII. Mengitung kuat tahanan momen untuk masing-masing kopel

$$M_{n1} = N_{D1} (d-a/2) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$M_{n2} = N_{D2}(d-d') \dots\dots\dots (3.16)$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots\dots\dots (3.17)$$

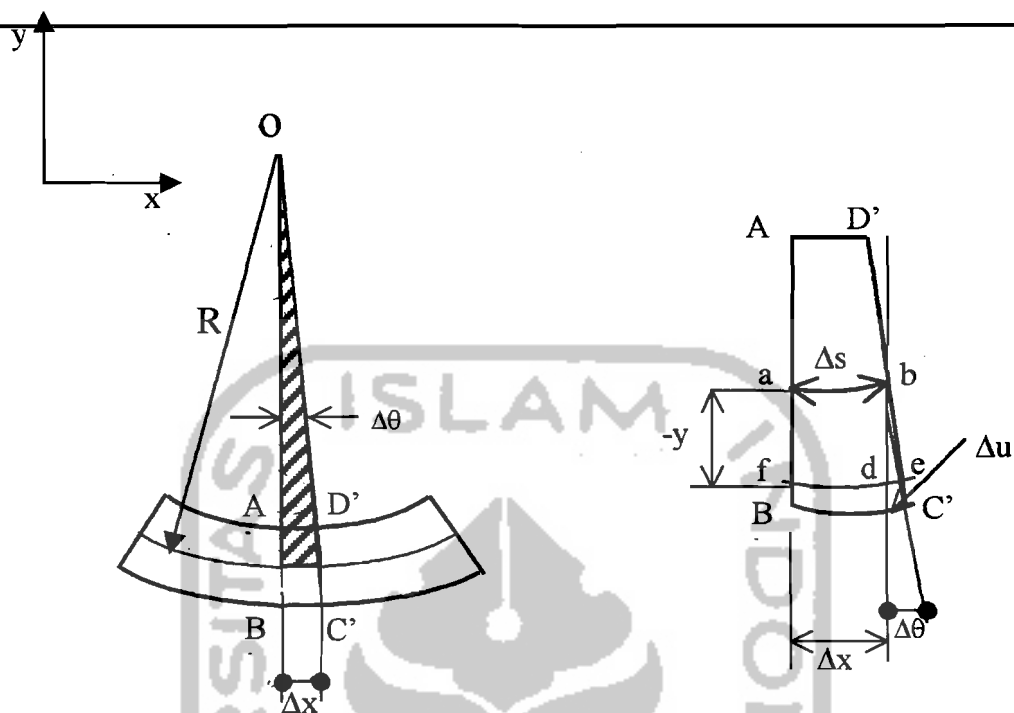
Dengan menggunakan rumus $N_{D1} = (0,85 f_c')ba$, maka semakin kecil nilai f_c' akan menyebabkan nilai N_{D1} akan menjadi kecil, sehingga nilai M_n akan mejadi lebih kecil.

VIII. $M_R = \Phi M_n \dots\dots\dots (3.18)$

Apabila nilai f_c' semakin kecil maka, nilai N_{D1} akan menjadi kecil yang menjadikan nilai M_n akan menjadi kecil sehingga nilai M_R akan menjadi kecil juga.

3.5 Persamaan Diferensial Untuk Defleksi Balok

Menurut E.P. Popov (1995), teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Kinematika dasar yang menghipotesa bahwa irisan-irisan yang berbentuk bidang datar akan tetap merupakan bidang datar selama berdeformasi, seperti terlihat dalam Gambar 3.4



Gambar 3.4 Deformasi segmen balok dalam lenturan

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta s} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{\rho} \quad \dots \dots \dots (3.19)$$

Hubungan dasar antara kurva elastis dan regangan linier, didapat

$$\Phi = \frac{1}{R} = \kappa = -\frac{\epsilon}{y} \quad \dots \dots \dots (3.20)$$

karena sifat beban tidak di perhitungkan, maka hubungan ini digunakan untuk masalah-masalah elastis maupun tidak.

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \text{dan} \quad \sigma_x = -\frac{My}{I}$$

$$\text{sehingga} \quad \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \dots\dots\dots(3.21)$$

dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \dots\dots\dots(3.22)$$

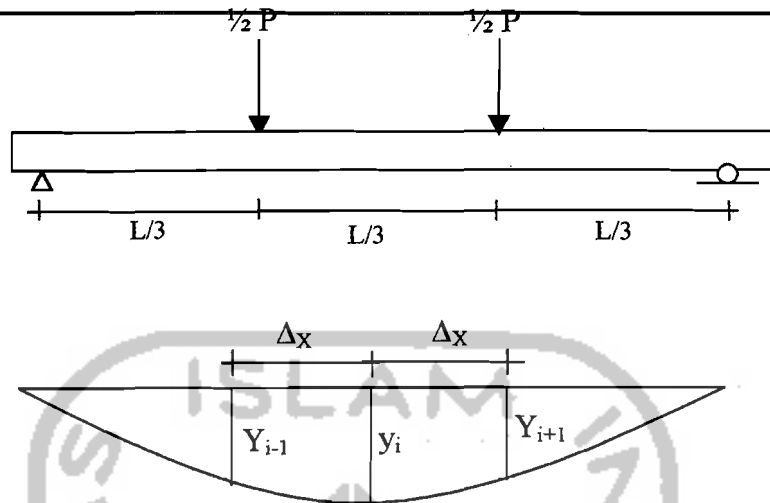
karena kemiringan dy/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$$

sehingga persamaan (3.27) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2} = \Phi \dots\dots\dots(3.23)$$

Dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik distrik. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Differences*.



Gambar 3.5 Lendutan

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_2 - y_1}{\Delta x} \dots\dots\dots (3.24)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \dots\dots\dots (3.25)$$

$$\Phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \dots\dots\dots (3.26)$$

Mengacu kepada gambar 3.5 didapat momen (M)

$$M = \frac{1}{6} PL \dots\dots\dots (3.27)$$

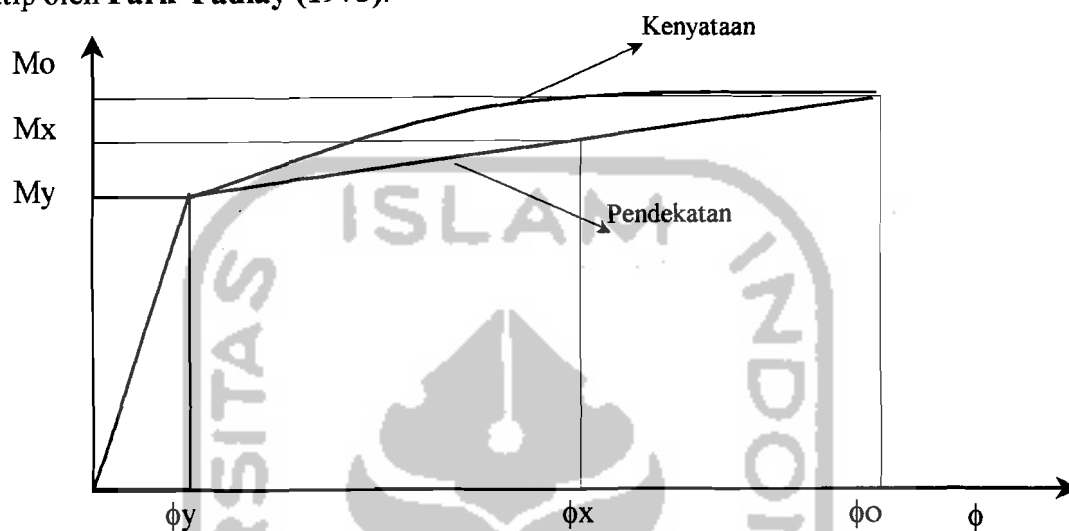
Sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus :

$$EI = \frac{M}{\Phi} \dots\dots\dots (3.28)$$

$$M = EI\Phi \dots\dots\dots (3.29)$$

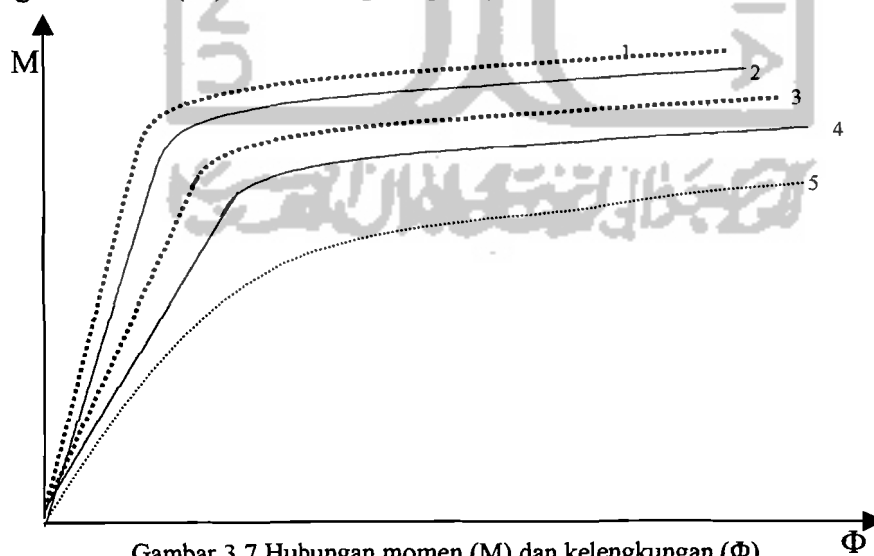
$$M = EI \frac{dy^2}{dx^2} \dots\dots\dots(3.30)$$

Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (ϕ) ditunjukkan pada gambar 3.6 seperti dikutip oleh Park Paulay (1975).



Gambar 3.6. Grafik momen kelengkungan

Hubungan momen (M) dan kelengkungan (Φ) balok beton, seperti pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Hubungan momen (M) dan kelengkungan (Φ)

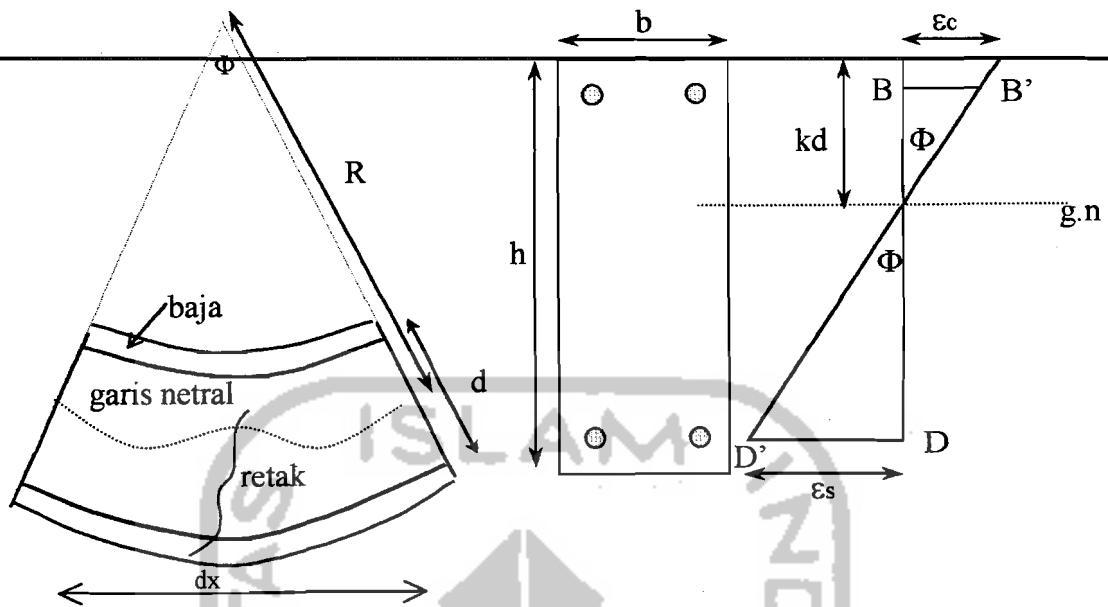
Keterangan gambar 3.7 :

1. Balok normal dengan agregat 100% kerikil.
2. Balok dengan agregat campuran pecahan genteng 25% dan kerikil 75%
3. Balok dengan agregat campuran kerikil 50% dan pecahan genteng 50%
4. Balok dengan agregat campuran kerikil 25% dan pecahan genteng 75%
5. Balok dengan agregat pecahan genteng 100%

3.6 Teori Momen dan Kelengkungan

1. Kelengkungan balok

Menurut **Park** dan **Pauley**, 1975, kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti gambar 3.8. Jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (k_d), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s).



Gambar 3.8 Kelengkungan Balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada gambar 3.8. maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

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

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

$$\Phi = \frac{1}{R}$$

maka :

$$\Phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.31)$$

dengan : Φ = kelengkungan

ϵ_c = regangan beton

ϵ_s = regangan baja

d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan Φ adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.8. 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 3.31 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan sebelah adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara Momen dan kelengkungan diberikan oleh persamaan :

$$EI = MR = \frac{M}{\Phi} \dots\dots\dots(3.32)$$

Dimana EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan meningkatnya momen, retak pada beton mengurangi faktor kekakuan di penampang. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit

menghasilkan sebuah kurva linear $M-\Phi$ diatas titik leleh baja. Ketika baja leleh, peningkatan yang besar terjadi didalam 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 dibawah beban layan Hubungan $M-\Phi$ dari beban 0 sampai leleh baja kedua garis hampir linear sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan $M-\Phi$ dalam bentuk bi-linear.

2. Leleh dan Ultimit Momen – Kelengkungan

Gambar 3.8. menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi bertulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja Φ_y mungkin dicari dengan persamaan 3.29 dalam istilah dari regangan baja saat leleh.

Persamaan Momen-Kelengkungan pada saat leleh pertama dicari dengan persamaan :

$$k = [(\rho + \rho')^2 n^2 + 2(\rho + \frac{\rho' d'}{d})n]^{1/2} - (\rho - \rho') \dots\dots\dots (3.33)$$

$$M_y = A_s \times f_y \times jd \dots\dots\dots (3.34)$$

$$\Phi_y = \frac{f_y}{E_s s} \dots\dots\dots (3.35)$$

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.

$$n = \frac{E_s}{E_y}, \rho = \frac{A_s}{bd}, \rho' = \frac{A'_s}{bd}$$

Pada beton yang menggunakan agregat campuran antara kerikil dengan pecahan genteng, semakin banyak penggunaan pecahan genteng dalam campuran beton maka akan didapatkan nilai f'_c yang semakin kecil sehingga apabila :

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

Maka apabila f'_c besar didapatkan nilai E_c yang semakin besar, dan akan didapatkan nilai n yang semakin kecil. Dengan nilai n yang kecil maka nilai k akan menjadi kecil dan nilai θ_y akan semakin kecil.

Kelengkungan ultimit dan momen dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 3.8) dicari dengan persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \dots\dots\dots (3.36)$$

$$Mu = 0,85 \cdot f'_c \times ab \times \left(d - \left(\frac{a}{2} \right) \right) + A'_s \times f_y \cdot (d - d'') \dots\dots\dots (3.37)$$

$$\Phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots\dots\dots (3.38)$$

Regangan baja yang tekan yang ditunjukkan pada gambar 3.8 dicari dengan persamaan :

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \times \left(\frac{c - d'}{c} \right) = \epsilon_c \left(1 - \left(\frac{\beta_1 \times d'}{a} \right) \right) \dots\dots\dots (3.39)$$

Dengan substitusi persamaan 3.36 ke persamaan 3.39 menunjukkan bahwa gaya tekan leleh ketika :

$$\epsilon_c \left[1 - \beta_1 \times d' \left(\frac{0,85 \times f'_c \times b}{A_s \times f_y - A'_s \times f_y} \right) \right] \geq \frac{f_y}{E_s} \dots\dots\dots (3.40)$$

Jika persamaan 3.40 kurang sesuai baja tekan tidak leleh maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan persamaan :

$$f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s \dots\dots\dots (3.41)$$

maka momen ultimit dapat dicari dengan persamaan:

$$Mu = 0,85 \times f'_c \cdot ab \times \left(d - \left(\frac{a}{2} \right) \right) + A_s \times E_s \times \epsilon_c - \left(\left(\frac{a - \beta_1 d'}{a} \right) \times (d - d') \right) \dots\dots\dots (3.42)$$

dan kelengkungan Φ_u dicari dengan persamaan 3.38.

Perubahan momen ultimit sebanding dengan perubahan kuat tekan beton, sehingga:

$$M_n = 0,85 \cdot f_c' \cdot ab \cdot (d - \frac{a}{2}) + A_s' \cdot E_s \cdot \epsilon_s - \frac{a - \beta_1 d'}{a} (d - d') \dots\dots\dots (3.43)$$

Ukuran dari meningkatnya momen lentur setelah leleh dikenal M_u/M_y . Rasio ini ditentukan dari persamaan 3.37 dan 3.38 atau persamaan 3.41 dan 3.42 untuk penampang bertulangan tunggal dengan $\rho \leq 0,02$, $f_c' \leq 34,45 \text{ N/mm}^2$ atau 226 N/mm^2 , persamaan ini menunjukkan bahwa $M_u/M_y \leq 1,06$. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan momen setelah leleh adalah kecil. Peningkatan mungkin lebih signifikan untuk penampang bertulangan rangkap. Rasio Φ_u/Φ_y dapat ditulis seperti:

$$M_u = 0,85 \times f_c' ab \times \left(d - \left(\frac{a}{2} \right) \right) + A_s \times E_s \times \epsilon_c - \left(\left(\frac{a - \beta_1 d'}{a} \right) \times (d - d') \right) \dots\dots (3.44)$$

$$\frac{\Phi_u}{\Phi_y} = \frac{\epsilon_c}{f_y/E_s} \cdot \frac{d(1-k)}{a/\beta_1} \dots\dots\dots (3.45)$$

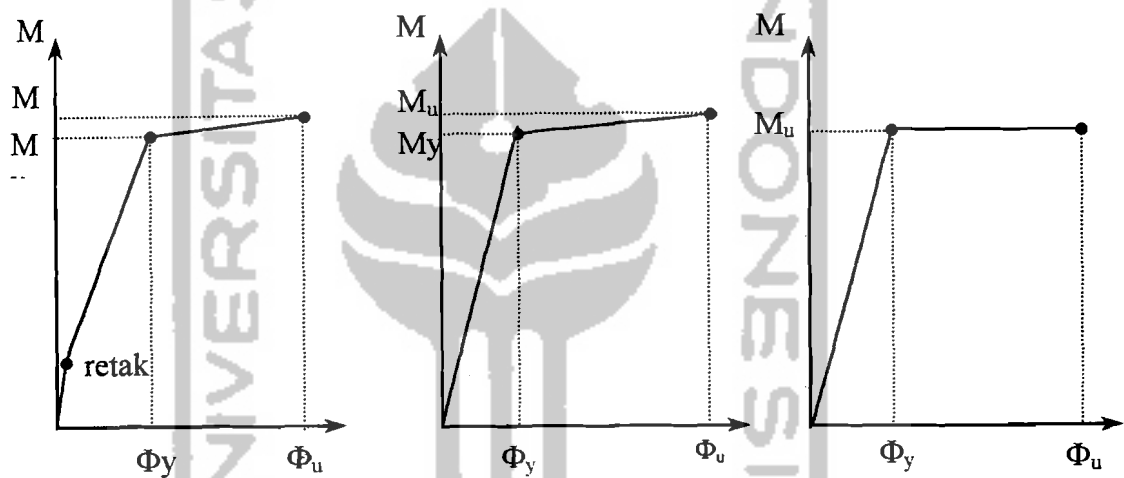
Apabila beton menggunakan agregat campuran kerikil dengan pecahan genteng apabila prosensi genteng besar, maka nilai f_c' akan semakin kecil dan didapatkan nilai E_c yang semakin kecil sehingga nilai n akan menjadi besar yang mengakibatkan nilai k menjadi kecil sehingga nilai θ_u/θ_y akan menjadi besar.

Persamaan 3.31 digunakan untuk menentukan faktor daktilitas kelengkungan dalam kasus umum dari penampang bertulangan ganda. Jika persamaan 3.31 memuaskan, baja tekan leleh dan substitusi persamaan 3.36 dan 3.38 ke dalam persamaan 3.47 didapatkan persamaan faktor kelengkungan daktil yaitu :

$$\frac{\Phi_u}{\Phi_y} = \frac{\left(0,85\beta_1 \cdot E_s \cdot \epsilon_c \cdot f_y''\right)}{f_y^2 (\rho - \rho_1)} \left\{ 1 + (\rho - \rho_1)n - [(\rho + \rho^2)n^2 + 2\left(\left(\rho + \frac{\rho'd'}{d}\right)n\right)^{\frac{1}{2}}] \right\} \quad (3.46)$$

Jika baja tekan belum leleh maka faktor kelengkungan dicari dengan persamaan :

$$\frac{\Phi_u}{\Phi_y} = \left(\frac{\beta_1 \cdot E_s \cdot \epsilon_c}{f_y}\right) \times \left\{ \frac{1 + (\rho - \rho_1)n - (\rho + \rho^2)n^2 + 2\left(\left(\rho + \frac{\rho'd'}{d}\right)n\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\rho'\epsilon_c E_s - \rho f_y}{1,7f_c}\right)^2 + \left(\frac{\rho'\epsilon_c E_s \beta_1 d'}{0,85f_c d}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\rho'\epsilon_c E_s - \rho f_y}{1,7f_c}\right)} \right\} \dots (3.47)$$



Gambar 3.8 Kurva momen kelengkungan

Dari Gambar 3.8 menunjukkan bahwa kurva momen kelengkungan pertama berbentuk trilinear, kemudian berubah menjadi kurva bilinear