

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Umum

Karakteristik dari beton perlu dipertimbangkan dalam hubungannya dengan kualitas yang dituntut untuk suatu tujuan konstruksi tertentu. Kuat desak beton dipengaruhi oleh jenis dan kualitas semen, bentuk dan tekstur permukaan agregat, bahan campur, perawatan, suhu dan umur beton. Menurut SK-SNI, (1993), modulus elastisitas beton normal merupakan fungsi dari kuat desak beton

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} . \quad (3.1)$$

Jika kuat desak beton ($f'c$) makin meningkat maka modulus elastis beton (E_c) naik, semakin besar nilai E_c faktor kekakuan lentur komponen struktur (EI) makin meningkat dan kekakuannya (K) meningkat sehingga kekuatan beton bertambah.

3.2. Material Penyusun Beton

Beton adalah suatu bahan elemen struktur yang memiliki suatu karakteristik yang spesifik yang terdiri dari beberapa bahan penyusun sebagai berikut.

3.2.1. Semen portland

Komposisi kandungan kimia dalam beton paling banyak adalah CaO dan SiO_2 , untuk kandungan senyawa yang lain dapat dilihat pada Tabel 3.1. Unsur utama yang terkandung dalam semen dapat digolongkan kedalam empat bagian (Tabel 3.2) yaitu

C_3S , C_2S , C_3A dan C_4AF . C_3S dan C_2S merupakan utama yang menempati sekitar 70 sampai 80 persen dari seluruh proporsi semen sehingga merupakan bagian yang paling dominan dalam memberikan sifat semen. Bila semen terkena air, maka C_3S akan segera berhidrasi dengan menghasilkan panas. Selain itu, unsur ini juga berpengaruh besar terhadap pengerasan semen, terutama setelah mencapai umur 14 hari. Sebaliknya C_2S bereaksi dengan air lebih 7 hari, dan memberikan kekuatan akhir. C_2S ini juga membuat semen tahan terhadap serangan kimia dan akan mempengaruhi susutan pengeringan. Unsur ketiga dalam semen adalah C_3A , unsur ini berpengaruh setelah beton berumur 14 hari, sedang unsur keempat C_4AF kurang begitu besar pengaruhnya terhadap proses pengerasan semen, (Neville, 1975).

Tabel 3.1. Porsentasi dari komposisi unsur kimia sement portland (Neville dan Brook, 1986)

Unsur	Kandungan (%)
CaO	63
SiO ₂	20
Al ₂ O ₃	6
Fe ₂ O ₃	3
NgO	1.5
SO ₃	2
K ₂ O } Na ₂ O }	1

Tabel 3.2 Persentasi komposisi semen portland (Neville dan Brook, 1987)

Jenis semen	Komponen (%)							Hilang dalam reaksi
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO	MgO	
NORMAL, I	59	15	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2
MODIFIKASI, II	46	29	6 (8 max)	12	2.8	0.6	3.0	1
KEKUATAN AWAL TINGGI, III	60	12	12 (15 max)	8	3.9	1.3	2.6	1.9
PEMANASAN RENDAH, IV	30 (35max)	46 (40max)	5 (7 max)	13	2.9	0.3	2.7	1.0
TAHAN SULFAT, V	35	36	4 (5 max)	12	2.7	0.4	1.6	1.0

Menurut **Kusnadi,(1985)**, komposisi silika untuk semen portland dibatasi dengan menentukan perbandingan “silica ratio” yang didekati dengan Persamaan:

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

Dari Persamaan 3.2 tampak bahwa semakin tinggi kandungan silika dalam semen portland, makin besar nilai SR. Nilai SR dibatasi : $1,6 < SR < 3,5$ dengan nilai rata-rata 2,0-2,5

Neville dan Brook, (1987), pengurangan atau salah satu unsur semen seperti silika akan mengubah persentasi senyawa kimia semen portland. Analisis kimia senyawa tersebut adalah sebagai berikut:

1. Tricalcium silikat (C_3S)

$$C_3S = 4.07(CaO) - 7.6(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3) \quad (3.3)$$

2. Dikalsium silikat (C_2S)

$$C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.754(C_3S) \quad (3.4)$$

3. Trikalsium aluminat (C_3A)

$$C_3A = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3) \quad (3.5)$$

4. Tetrakalsium alumino ferrit (C_4AF)

$$C_4AF = 3.04(Fe_2O_3) \quad (3.6)$$

Dari Persamaan 3.6 akan diperoleh persentasi senyawa kimia dari semen portland, sehingga dapat diketahui kenaikan atau penurunan kandungan senyawa kimia dari semen portland tersebut akibat adanya bahan tambah (Tabel 3.3)

Tabel 3.3 Hasil Analisis Silika Gergajian Batu Andesit

Jenis Semen	Prosentasi (%)				Silika Ratio (SR)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
Jenis I	54,1	16,61	10,83	9,12	2,22
Modifikasi 5%	44,42	23,29	10,68	8,66	2,27

Menurut Popovic, (1998), kekuatan beton berdasarkan komposisi kandungan senyawa yang terdapat dalam semen dan umur beton dapat didekati dengan Persamaan 3.7. Untuk koefisien dari Persamaan 3.7 dapat dilihat pada Tabel 3.4.

$$f = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \quad (3.7)$$

Tabel 3.4 Koefisien untuk Persamaan 3.7 (Popovic)

Senyawa Kimia	Umur		
	3 hari	7 hari	28 hari
C ₃ S	27.4	40	48.8
C ₂ S	-1.1	-5.1	19.1
C ₃ A	24.1	58.4	100.1
C ₄ AF	-9.8	-0.2	30.8

3.2.2. Agregat

Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar beton. Agregat ini biasanya menempati sekitar 75 % dari total beton. Agregat halus atau pasir yang digunakan berupa pasir alam dengan ukuran kurang dari 5 mm. Agregat kasar sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan alam atau berupa batu pecah dengan ukuran 5 – 40 mm. Agregat kasar ini dapat berasal dari alam atau dari mesin pemecah batu yang telah disaring dengan ukuran tertentu.

3.2.3. Air

Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen serta menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan. Untuk mengadakan reaksi hidrasi dengan semen diperlukan sedikitnya 20-30 % jumlah air dari berat semen.

3.2.4. Limbah gergajian batu andesit

Limbah gergajian batu andesit yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai ukuran 75-150 μm . Bahan tambah ini diharapkan dapat mengisi pori-pori dalam beton sehingga dapat menambah karakteristik kohesif dari beton dan oleh karenanya memperbaiki ketahanan terhadap bleeding. Selain mengandung senyawa silika (SiO_2), batu andesit juga mengandung TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O (Anthony Hall, 1987) lihat Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Kandungan Unsur Kimia Batu Andesit

Parameter	Hasil analisa (%)
SiO_2	58.9
Al_2O_3	17.2
CaO	6.9
Fe_2O_3	3.3
FeO	4.3
TiO_2	0.9
MgO	3.4
Na_2O	3.5
K_2O	1.7

Sumber: Neous Petrology, Anthony Hall, 1987

Menurut **Popovic,(1998)**, udara void dalam pasta semen merupakan hasil konsolidasi yang tidak sempurna atau proses penguapan air yang terlalu cepat atau kedua-duanya. Volume dari udara void (V_a), sebenarnya menunjukkan kandungan yang konstan dalam umur pasta semen atau beton. Dengan kata lain banyaknya void dalam beton keras secara praktis sama dengan umur kandungan udara dari beton dalam bentuk yang masih segar. Sebaliknya volume dari porositas kapiler, volume air (V_w) menurun sejalan dengan umur beton dalam kondisi dibawah normal karena proses hidrasi keluar dari pori-pori tersebut secara berangsur-angsur.

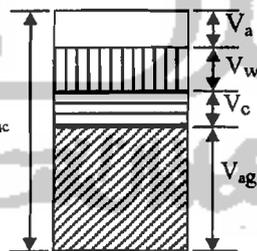
Persamaan dibawah ini menunjukkan kandungan dari volume beton.

$$V_c + V_{ag} + V_w + V_a = V_{conc} \quad (3.7)$$

dimana, V_c dan V_{ag} = volume semen dan volume agregat dalam beton

V_w dan V_a = volume air dan udara dalam beton

V_{conc} = volume sampel beton



Gambar 3.1. Skema komposisi beton segar

Untuk kandungan dalam proporsi berat dapat dilihat dalam Persamaan 3.8.

$$W_c + W_{ag} + W_w = W_{conc} \quad (3.8)$$

Dimana, W_c , W_{ag} = berat semen dan berat agregat

W_w , W_{conc} = berat air, dan berat sampel beton.

Menurut **Popovic, (1998)**, luas permukaan gel di dekati dengan ukuran “gel space ratio” (X_F) yang dapat dihitung dengan Persamaan:

$$X_F = \frac{V_g}{V_w + V_a + V_p} \quad (3.9)$$

dengan, V_g = volume gel

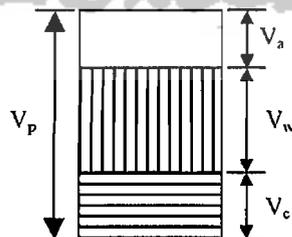
V_p = volume pasta semen

Dari Persamaan 3.9. tampak bahwa semakin besar jumlah gel yang terbentuk maka “gel space ratio” makin besar. Hubungan antara “gel space ratio” dan kuat desak beton dihitung dengan persamaan :

$$f_c = 29000 \cdot X_F^3 \quad (3.10)$$

Dari Persamaan 3.10 tampak bahwa “gel space ratio” (X_F) merupakan fungsi pangkat tiga dari kuat desak beton (f_c) sehingga semakin besar “gel space ratio” (X_F), makin besar kuat desak beton (f_c).

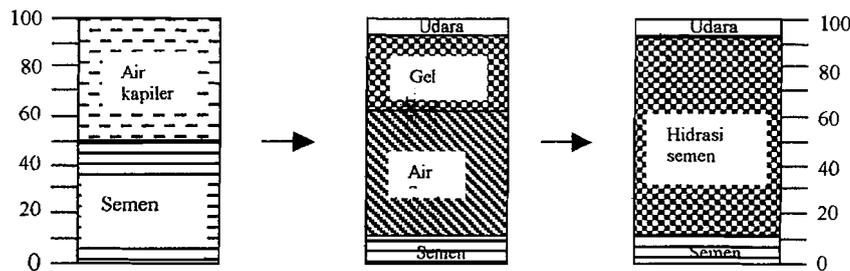
Menurut **Popovic, (1998)**, porositas terbentuk pada saat hidrasi semen berlangsung. Komposisi volume udara, air, dan semen pada saat hidrasi semen dapat diperlihatkan seperti tampak pada Gambar 3.2



Gambar3.2. Skema komposisi pasta

Dari Gambar 3.2. hubungan antara pasta semen (V_p), volume udara (V_a), volume air (V_w), dan volume semen (V_c) dapat didekati dengan Persamaan :

$$V_p = V_a + V_w + V_c \quad (3.11).$$



Gambar 3.3. Skema Hidrasi Semen

Dari Gambar 3.3 pada saat hidrasi berlangsung, proses pencampuran air dan semen menghasilkan gel yang diikuti dengan naiknya air semen ke permukaan (bleding) melalui pori kapiler. Jumlah pori kapiler yang terbentuk dalam hidrasi semen dihitung dalam persen yang didekati dengan Persamaan:

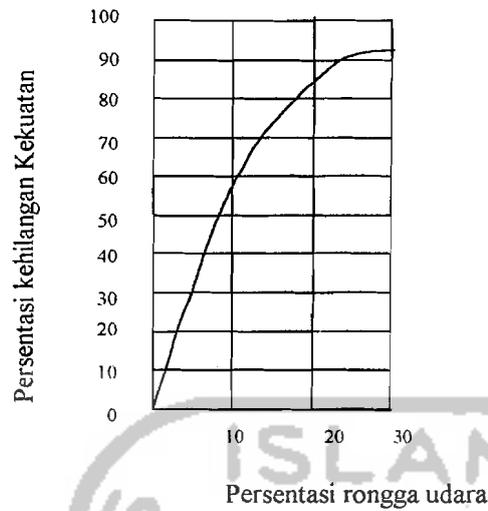
$$p = \frac{V_a + V_w + V_p - V_g}{V} \quad (3.12)$$

Dari Persamaan di atas menunjukkan bahwa karakteristik porositas di dalam pasta semen menunjukkan persentasi ruang yang dapat diisi oleh semen gel.

3.2.5. Tinjauan porositas terhadap kekuatan beton

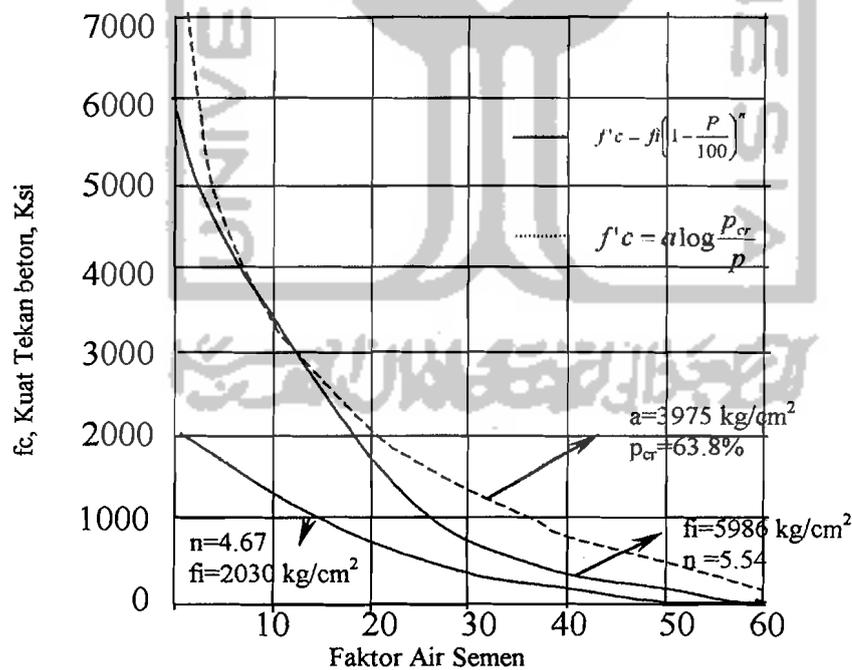
Menurut Murdock dan Brook (1986), suatu indikasi atau petunjuk kehilangan kekuatan yang disebabkan oleh adanya rongga-rongga, Rongga-rongga termasuk volume udara yang terperangkap, dan rongga yang terbentuk oleh pengeringan air yang berlebihan. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 3.4

Dari Gambar 3.4 nampak bahwa semakin besar ruangan rongga maka beton akan kehilangan kekuatan semakin besar.



Gambar 3.4 Hubungan antara kehilangan kekuatan dengan ruangan rongga udara

Kadar pori yang terkandung dalam beton sangat berpengaruh terhadap kekuatan beton, semakin besar kadar pori (porositas) maka kuat tekan semakin kecil, sebaliknya semakin kecil porositasnya maka kuat tekan makin meningkat.



Gambar 3.5 Hubungan porositas kapiler dan Kuat desak beton

Menurut **Popovic (1998)**, mengacu dari Gambar 3.5 hubungan kuat desak beton dan porositas di dekati dengan Persamaan:

$$f'c = f_i \left(1 - \frac{P}{100}\right)^n \quad (3.13)$$

dan

$$f'c = a \log \frac{p_{cr}}{p} \quad (3.14)$$

Dari kedua Persamaan 3.13 dan 3.14 nampak bahwa semakin besar porositas kapiler maka kuat desak beton semakin kecil.

Kuat tekan beton merupakan fungsi eksponensial dari fungsi porositas (Popovic, 1998), hal ini dapat dijelaskan pada Persamaan dibawah ini.

$$f_{rel} = \frac{f}{f_o} = 10^{-\gamma a} \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{B_a^a} \quad (3.16)$$

dengan γ - kofisien eksperimental yang bebas antara kekuatan dan umur material dalam praktek terbatas tetapi tergantung berdasarkan tipe dan kekuatan material.

$$B_a = 10^\gamma \quad (3.17)$$

$$a = \frac{100V_a}{V} \quad (3.18)$$

dengan a = Kandungan udara dalam volume beton (%)

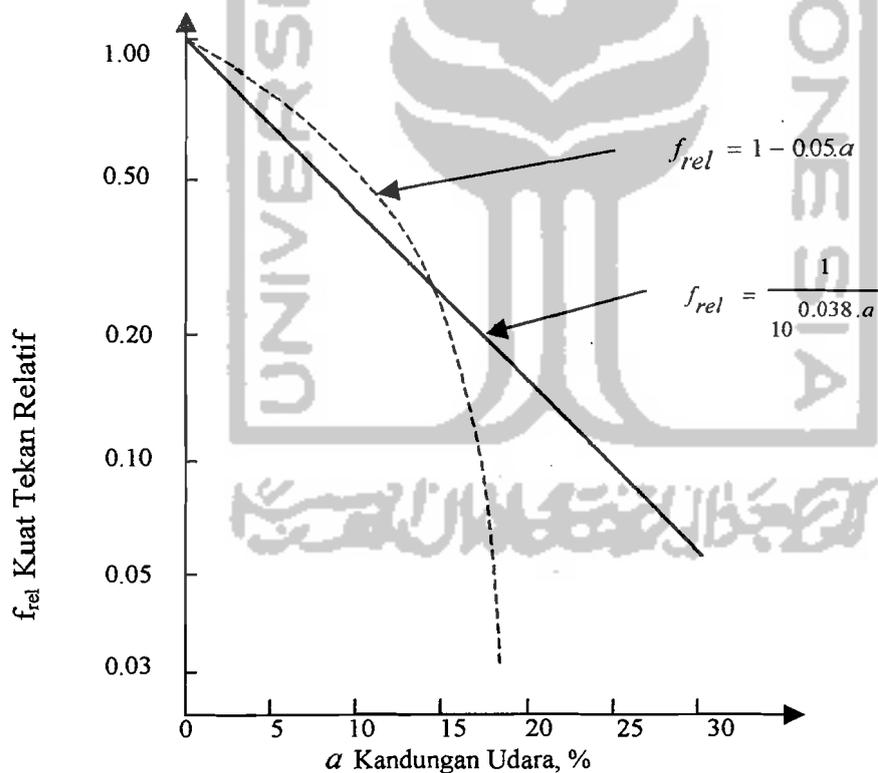
V_a = Volume udara dalam cetakan beton padat

V = Volume beton padat termasuk termasuk volume udara

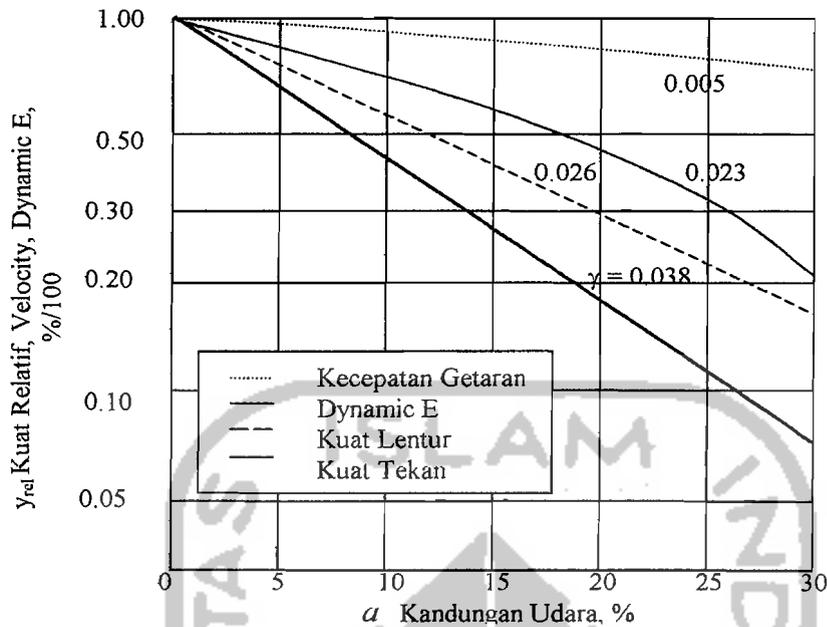
Jika $\gamma = 0.0384$ untuk kuat tekan beton normalnya kira-kira 30% kandungan udaranya dalam umur 7 dan 90 hari (Popovics, 1998).

Dari Persamaan 3.15 dan Gambar 3.6 tampak bahwa semakin kecil porositas semakin tinggi kuat desak beton yang dihasilkan. Seperti digambarkan pada Gambar 3.7 dan Persamaan 3.15 juga dapat digunakan untuk kuat lentur tetapi dengan $\gamma = 0.0232$. Persamaan ini dapat digunakan untuk beberapa bahan material lain penyusun beton keras meskipun nilai γ berbeda.

Dari Persamaan 3.15 dan Gambar 3.7 bahwa kuat lentur beton juga meningkat dengan berkurangnya kandungan pori-pori dalam beton.



Gambar 3.6 Menjelaskan efek kandungan udara terhadap kuat tekan beton



Gambar 3.7 Menjelaskan efek relatif dari kandungan udara pada beberapa karakteristik beton.

3.3. Slump

Slump merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui tingkat kelecakan suatu adukan beton. Tingkat ini berkaitan erat dengan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*). Makin besar nilai slump berarti semakin cair adukan betonnya, sehingga adukan beton semakin mudah di kerjakan.

3.4. Workability

Kemudahan pengerjaan (*workability*) merupakan ukuran tingkat kemudahan adukan beton untuk dikerjakan termasuk diaduk, dituang dan dipadatkan. Perbandingan bahan-bahan penyusun beton dan sifat-sifat bahan penyusun beton, secara bersama-sama mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan adukan beton.

3.5 Kuat Tekan Beton

Kekuatan desak bila di periksa dengan sejumlah benda uji, nilai akan menyebar sekitar suatu nilai rata-rata tertentu. Dengan menganggap nilai-nilai hasil pemeriksaan tersebut menyebar normal, maka ukuran besar kecilnya penyebaran dari nilai-nilai hasil pemeriksaaan kuat desak beton didapatkan berdasarkan Persamaan deviasi standar (ACI).

$$f'_{ck} = f'_{c} - 1.64 \cdot S \quad (3.19)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (f'_{c} - f'_{cr})^2}{N - 1}} \quad (3.20)$$

dengan : S = deviasi standar

f'_{c} = kuat desak beton masing-masing benda uji

f'_{cr} = kuat desak beton rata-rata

dengan :

$$f'_{cr} = \frac{\sum_1^n f'_{c}}{N} \quad (3.21)$$

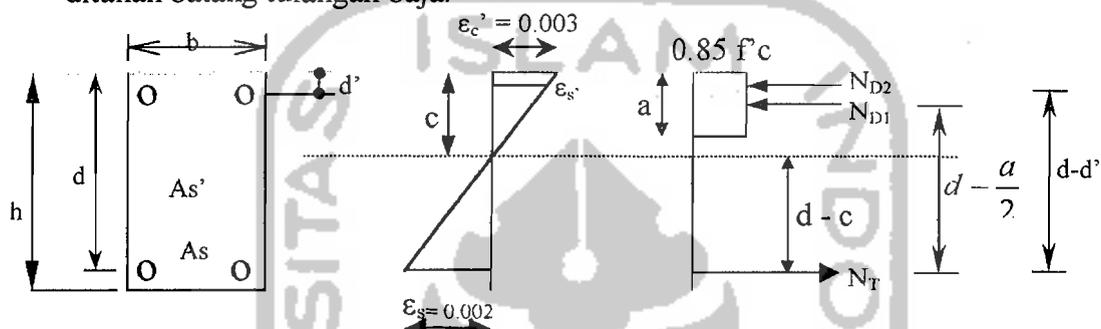
N = jumlah benda uji

3.6 Kuat Lentur

Menurut Istimawan, (1994), Pendekatan dan perencanaan didasarkan atas anggapan-anggapan sebagai berikut:

1. bidang potongan tampang rata sebelum lentur akan tetap rata sesudah lenturan terjadi, berarti nilai regangan akibat lentur terdistribusi linear dengan nilai nol pada garis netral dan nilai maksimum pada serat tepi terluar

2. tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai kira-kira beban sedang yaitu saat tegangan beton tekan tidak melampaui $\pm \frac{1}{2} f'_c$. Bila beban meningkat sampai beban batas, tegangan yang timbul tidak lagi sebanding dengan regangan, sehingga blok tegangan tekan berupa garis lengkung.
3. dalam menghitung kapasitas momen, beton tarik diabaikan, seluruh gaya tarik ditahan batang tulangan baja.



Gambar 3.8 Distribusi regangan dan tegangan lentur balok beton bertulang.

Untuk menghitung gaya tekan maka Whitney mengusulkan agar digunakan blok tegangan segi empat ekuivalen, yang berarti juga dapat digunakan untuk menghitung kekuatan lentur penampang. Besarnya tegangan rata-rata dari blok tegangan segiempat ekuivalen adalah $0.85 f'_c$ sedalam "a". besarnya "a" ditentukan dengan Persamaan:

$$a = \beta \cdot c \quad (3.22)$$

dimana, c = jarak serat tekan terluar ke garis netral

β = konstanta yang merupakan fungsi dari kelas kuat beton.

Harga β diberikan dengan Persamaan sebagai berikut

- untuk $f'_c \leq 30 \text{ MPa} \Rightarrow \beta = 0.85$ (3.23)

- untuk $f'_c > 30 \text{ MPa} \Rightarrow \beta = 0.85 - 0.008 \cdot (f'_c - 30) \geq 0.65$ (3.24)

Dari Gambar 3.8 periksa regangan tulangan baja desak dan baja tarik (kompatibilitas) :

$$\epsilon_s' = \frac{c-d'}{c} \epsilon_{cu} \quad (3.25)$$

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{c} \epsilon_{cu} \quad (3.26)$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \quad (3.27)$$

Dalam perencanaan dimensi balok dengan menggunakan tulangan rangkap terdapat dua anggapan :

- a) jika tulangan baja desak (A_s') telah leleh sebelum beton mencapai regangan 0,003 atau $\epsilon_s' \geq \epsilon_y$ maka :

nilai a dihitung dengan Persamaan :

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{(0,85 \cdot f'c) \cdot b} \quad (3.28)$$

Kekuatan momen lentur nominal dapat dihitung dengan Persamaan:

$$M_n = (A_s - A_s') \cdot f_y \cdot (d - 1/2 \cdot a) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (3.29)$$

- b) jika tulangan baja desak (A_s'), belum leleh pada saat beton mencapai regangan desak 0,003 atau $\epsilon_s' \leq \epsilon_y$ dan $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ maka :

letak garis netral (c) didekati dengan Persamaan :

$$(0,85 \cdot f'c \cdot b \cdot \beta) c^2 + (600 A_s' - A_s \cdot f_y) \cdot c - 600 d' \cdot A_s' = 0 \quad (3.30)$$

tegangan tulangan baja desak (f_s') dicari dengan Persamaan :

$$f_s' = \frac{c-d'}{c} (600) \quad (3.31)$$

Mengacu dari Gambar 3.8 gaya desak yang terjadi adalah:

$$N_{D1} = 0,85 f'c.a.b \quad (3.32)$$

$$N_{D2} = A_s' f_s' \quad (3.33)$$

Gaya tarik dihitung dengan Persamaan:

$$N_T = A_s f_y \quad (3.34)$$

Keseimbangan gaya-gaya dalam adalah:

$$N_{D1} + N_{D2} - N_T = 0 \quad (3.35)$$

Kekuatan momen lentur nominal dapat dihitung dengan Persamaan:

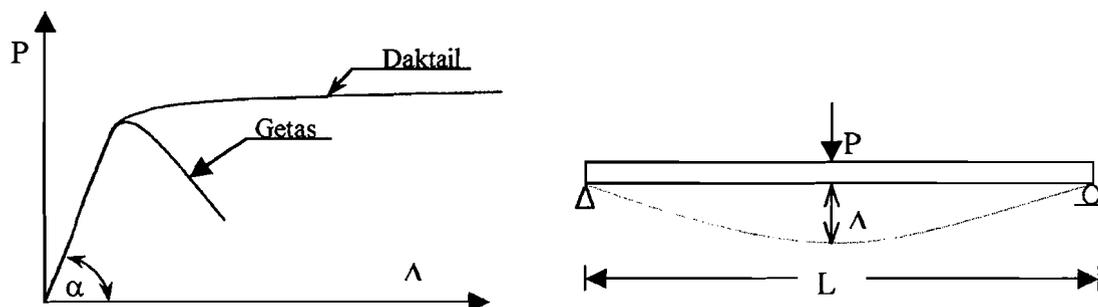
$$M_n = N_{D1} (d - 1/2.a) + N_{D2} (d - d') \quad (3.36)$$

kekuatan momen lentur ultimit dapat dihitung dengan Persamaan:

$$M_u = \phi.M_n \quad (3.37)$$

3.7 Hubungan Beban dan Lentutan

Menurut Park dan Pauley, (1975), jika suatu balok dikenai beban, maka balok yang semula lurus akan mengalami perubahan bentuk menjadi sebuah kurva yang disebut dengan kurva lendutan (Δ). Struktur beton mengalami 2 fase yaitu fase linier dan fase plastis.



Gambar 3.9 Hubungan beban dan lendutan

Dari Gambar 3.9 tampak bahwa semakin besar beban yang bekerja pada beton bertulang, lendutan yang terjadi makin besar, sehingga balok akan mengalami “daktail”. Jika beban bekerja pada balok tanpa tulangan maka struktur akan mengalami getas, sehingga kekakuan balok (K) dapat dihitung dengan Persamaan:

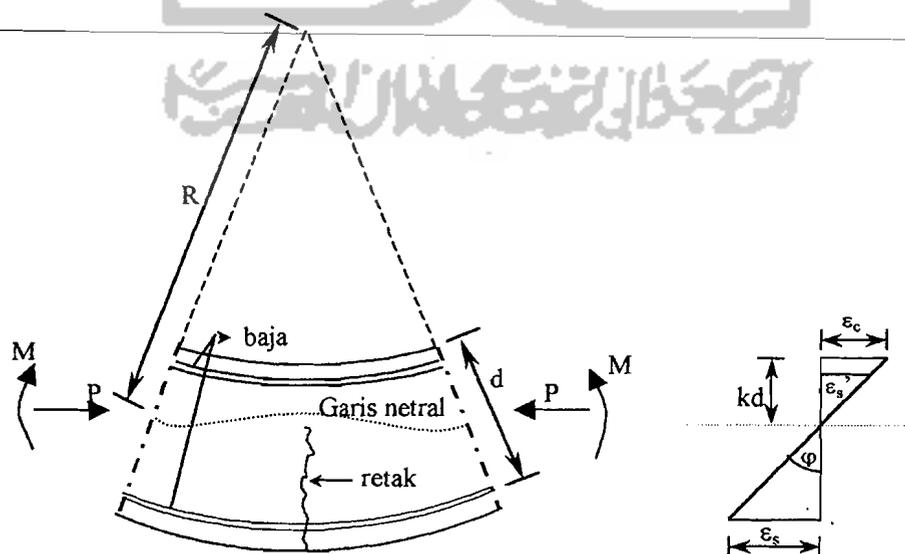
$$K = \text{tg } \alpha = \frac{P}{\Delta} \quad (3.38)$$

3.8 Hubungan Momen Dengan Kelengkungan

Menurut Park dan Pauley, (1975), kelengkungan terjadi pada saat balok mengalami retak karena dibebani gaya aksial yang bekerja. Adanya retak pada beton menunjukkan terjadinya penambahan tegangan pada balok sehingga merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi garis netral (c), regangan beton (ϵ_c), dan regangan baja tarik (ϵ_s). hubungan ketiga parameter tersebut dapat didekati dengan Persamaan:

$$\tan \varphi = \frac{dx}{R} = \frac{\epsilon_c dx}{kd} = \frac{\epsilon_s dx}{d(1-k)} \quad (3.39a)$$

$$\varphi = \frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} \quad (3.39b)$$

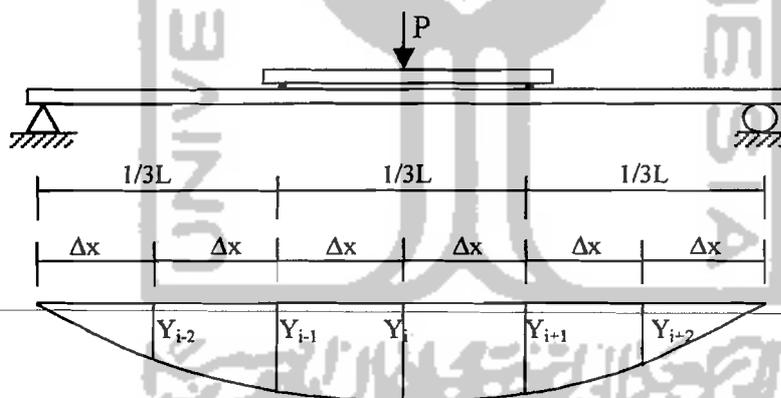


Gambar 3.10 Kelengkungan balok beton bertulang

Untuk menghitung kelengkungan (φ) dapat digunakan memasang alat “strain gauge” pada daerah regangan beton dan regangan baja. Dari Gambar 3.10 kelengkungan dapat di hitung dengan Persamaan sebagai berikut:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_c}{d} \quad (3.40)$$

Pengujian kuat lentur dengan “strain geuge” sangat praktis tetapi dari segi ekonomi biayanya sangat mahal, sehingga untuk menghitung kelengkungan digunakan metode numerik “central difference”. Metode numeris “central difference” adalah suatu cara pendekatan besarnya lendutan balok akibat pembebanan statis yang diperoleh dengan mengukur lendutan 3 titik secara berurutan pada jarak $1/3$ bentang (L) seperti tampak pada gambar 3.11



Gambar 3.11 Lendutan balok

Mengacu pada Gambar 3.11 hubungan antara model “displacement” (y) dengan panjang elemen (Δx) dapat didekati dengan Persamaan:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{y_i} = \frac{y_{i+1/2} - y_{i-1/2}}{\Delta x} \quad (3.41)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{i-1/2} \cong \frac{1}{\Delta x}(y_i - y_{i-1}) \quad (3.42)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{i+1/2} \cong \frac{1}{\Delta x}(y_{i+1} - y_i) \quad (3.43)$$

$$\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_i \cong \frac{1}{\Delta x} \left(\left(\frac{dy}{dx}\right)_{i+1/2} - \left(\frac{dy}{dx}\right)_{i-1/2} \right) \quad (3.44)$$

atau:

$$\varphi = \left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)_i = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}))}{(\Delta x)^2} \quad (3.45)$$

Mengacu dari Gambar 3.11 momen yang terjadi pada bentang (L) karena adanya beban (P) dapat diketahui dengan Persamaan:

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (3.46)$$

Faktor kekakuan untuk balok beton bertulang dapat didekati dengan Persamaan:

$$EI = \frac{M}{\varphi} \quad (3.47)$$

Menurut **Park dan Pauley,(1975)**, menyatakan bahwa hubungan momen dan kelengkungan dinyatakan dalam tiga bagian yaitu:

- a. momen kelengkungan sebelum retak

Momen dan kelengkungan didekati dengan Persamaan :

$$M_{cr} = \frac{f_r I}{y} \quad (3.48)$$

$$\varphi_{cr} = \frac{f_r}{E_c y} \quad (3.49)$$

$$f_r = 0.7 \sqrt{f_c'} \quad (3.50)$$

b. momen kelengkungan setelah retak pada saat leleh pertama

Momen dan kelengkungan yang terjadi pada balok didekati dengan Persamaan:

$$M_y = A_s f_y j d \quad (3.51)$$

$$\varphi_y = \frac{(f_y E_s)}{d(1-k)} \quad (3.52)$$

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n \quad (3.53)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.54)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3.55)$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad (3.56)$$

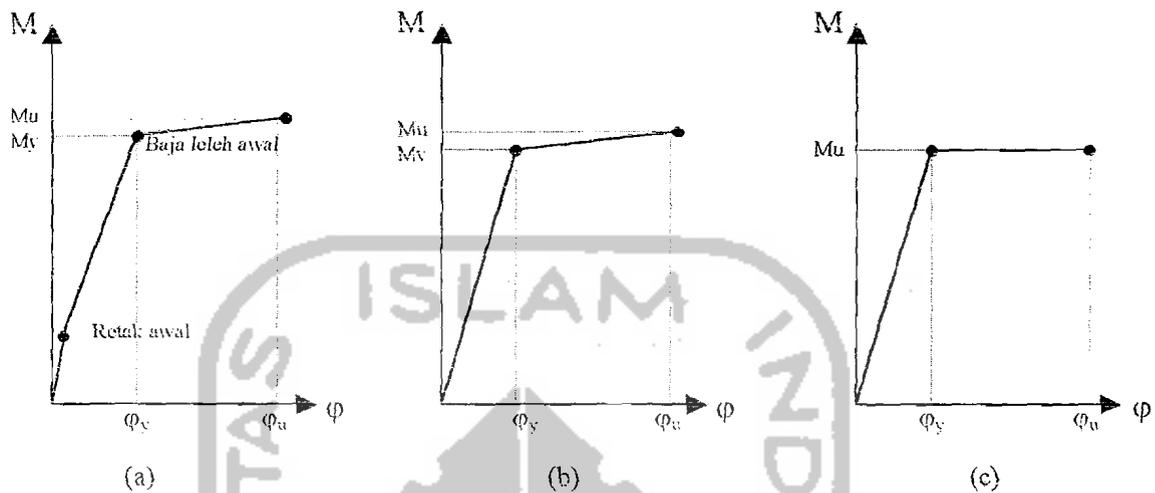
c. momen kelengkungan saat beban ultimit

Momen dan kelengkungan ditunjukkan dalam Persamaan berikut:

$$M_u = 0.85 f_c' ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_s' (d - d') \quad (3.57)$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_c \beta'}{a} \quad (3.58)$$

Hubungan $M-\phi$ ideal pada balok beton bertulang dapat digambarkan dengan grafik trilinear dan bilinear seperti tampak pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Kurva momen-kelengkungan ideal

Mengacu dari Gambar 3.12 (a) garis pertama menunjukkan retak awal, kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga merupakan regangan ultimit dari beton sehingga grafik ini disebut grafik trilinear. Gambar 3.12 (c) merupakan grafik bilinear yang menghasilkan pendekatan dari Gambar 3.12 (b) karena saat hubungan $M-\phi$ terjadi dari beban 0 KN hingga baja leleh, garis pertama dan kedua hampir linear sehingga grafik hubungan $M-\phi$ digambarkan dalam bentuk bilinear.

3.9 Menyesuaikan Kurva (Curve Fitting)

Untuk membantu menentukan persamaan yang menyatakan hubungan antara variabel, maka langkah pertama adalah mengumpulkan data yang menunjukkan nilai-nilai yang bersangkutan dari variabel-variabel yang diamati. Masalah umum untuk mencari persamaan-persamaan untuk pendekatan kurva yang sesuai dengan