

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 TINJAUAN PUSTAKA**

Beton adalah material yang telah banyak digunakan sebagai bahan konstruksi. Secara umum beton terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama adalah bahan matriks yang berfungsi sebagai pengikat antar material (*adhesive*), namun selain sebagai pengikat bahan matriks juga memberikan sumbangan kekuatan, apabila bahan ini tidak hadir pada beton maka beton tersebut tidak akan memiliki kekuatan sama sekali. Bagian yang kedua adalah bahan inklusi yang menyumbang sebagian besar kekuatan dari beton itu sendiri.

Beton dapat dibedakan menjadi beberapa macam. Dilihat dari wujudnya, beton dapat dibedakan menjadi dua macam. Yang pertama adalah beton segar (*fresh concrete*) dan yang kedua adalah beton keras (*hard concrete*). Beton segar tidak mempunyai kekuatan untuk menahan beban, walaupun 75% dari bahan penyusunnya terdiri dari partikel yang memiliki kekuatan terhadap tekanan yang cukup besar. Lain halnya dengan beton segar, beton keras sudah mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan beban yang cukup besar.

Perilaku beton dapat berbeda-beda berdasarkan atas sifat material penyusunnya, sebagai contoh perbedaan tipe semen yang digunakan dalam campuran beton akan menghasilkan karakteristik atau sifat beton yang berbeda satu dengan yang lainnya. Perbedaan terhadap sifat beton tersebut juga dapat terjadi menggunakan jenis agregat yang berbeda baik bersifat agregat kasar atau agregat halus. [Ariyuni, E., Zulfadhi, 1997].

Berdasarkan berat volumenya beton dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu beton ringan, berat dan normal. Umumnya beton dibuat dengan menggunakan bahan agregat yang mempunyai kepadatan seperti yang diinginkan. Beton yang menggunakan agregat ringan akan membentuk berat-volume beton menjadi ringan. Agregat ringan dapat berasal dari alam yang disebut dengan agregat ringan

alami; agregat ringan yang berasal dari proses pemanasan atau pembakaran material lain disebut agregat ringan buatan. [Mulyono, T, 2003].

Kemungkinan pemakaian benda limbah padat buangan sebagai bahan pengganti agregat ringan alami akhir-akhir ini banyak diperbincangkan. Limbah padat ini dapat berupa kaleng-kaleng bekas, bahan-bahan bekas bongkaran bangunan, maupun sampah padat dari hasil limbah industri ataupun rumah tangga. Sebelum barang ini dipakai sebaiknya ditinjau aspek ekonomi keuntungan penggunaan bahan-bahan ini dibandingkan dengan pemakaian agregat ringan alami. Harus pula dipertimbangkan aspek teknisnya, yang meliputi pengerjaan dan kekuatan beton. [Mulyono, T, 2003].

## 2.2 AGREGAT RINGAN

Suatu beton tersusun dari butiran agregat mulai dari butiran terkecil sampai yang terbesar menurut kebutuhan konstruksinya. Agregat itu dapat dibuat dari batu pecah dengan pecahan yang tidak teratur, bentuknya juga tidak seragam, dan dapat juga dibuat dari susunan butir kerikil alam yang biasanya agak bulat-bulat butirnya.

Agregat adalah bahan-bahan campuran beton yang saling diikat oleh bahan perekat semen. [Gideon, 1994:148]. Kandungan agregat dalam campuran beton biasanya sangat tinggi. Berdasarkan pengalaman dan keadaan di lapangan, komposisi agregat tersebut berkisar antara 70% - 80% dari berat campuran beton. Walaupun fungsinya hanya sebagai pengisi, tetapi karena komposisinya yang cukup besar, agregat ini pun menjadi penting. Karena karakteristik agregat akan sangat menentukan sifat beton yang akan dihasilkan, terutama ketahanan dan kekuatannya.

Untuk menghasilkan campuran beton ringan, biasanya menggunakan agregat ringan dalam campuran betonnya. Agregat ringan adalah agregat yang mempunyai berat isi kering oven gembur maksimum  $1100 \frac{kg}{m^3}$ . Agregat ringan juga mempunyai berat jenis (*specific gravity*) yang rendah, sekitar  $\frac{1}{3} - \frac{2}{3}$  dari berat jenis agregat normal. Berat isi dan berat jenis dari agregat ini sangat dipengaruhi oleh gradasi dan ukuran agregat itu sendiri. Agregat yang butiran

kecil mempunyai berat jenis yang lebih besar daripada butiran agregat yang besar. Hal ini disebabkan karena berat jenis agregat dapat berkurang dengan adanya kandungan udara di dalam agregat tersebut. Semakin berpori suatu agregat, akan semakin ringan beratnya dan daya hantar panasnya akan semakin rendah tetapi kekuatan agregat menjadi lebih rendah. Karena itu, beton untuk keperluan insulasi mempunyai kekuatan yang sangat rendah, sedangkan beton ringan struktural yang mempunyai daya hantar panas yang cukup tinggi akan mempunyai kekuatan agregat yang lebih tinggi pula.

Esensi agregat ringan adalah agregat yang mempunyai berat jenis ringan, porositas tinggi serta konduktivitas panasnya rendah, yang dapat dihasilkan dari agregat alam maupun hasil fabrikasi yang disebut dengan agregat buatan (*artificial aggregate*). Namun ada beberapa masalah yang timbul bila menggunakan agregat ringan yaitu kemudahan pengerjaan (*workability*) dan penyelesaian (*finishability*) betonnya yang rendah, tendensi terjadinya segregasi meningkat, sulit untuk menentukan nilai faktor air semen yang efektif dan kekuatan beton yang dihasilkan cenderung akan menurun. [Popovics, 1979].

Penggunaan agregat ringan didasarkan atas pertimbangan biaya produksi untuk menghasilkan agregat ringan dan pengerjaan struktur beton itu sendiri. Secara struktural pertimbangan didasarkan atas berat-volume atau kepadatan dari beton yang terbentuk dimana akan menjadi lebih ringan dibandingkan menggunakan agregat normal, sehingga jika digunakan untuk struktur atas akan lebih ringan yang pada akhirnya beban konstruksi menjadi lebih kecil. [Weddell, Dobrowolski, 1990].

### **2.2.1 Karakteristik Agregat Ringan**

Agregat ringan memiliki karakteristik yang berbeda dengan karakteristik agregat normal. Berikut ini akan dibahas beberapa karakteristik dari agregat ringan :

#### **1. Bentuk Partikel dan Permukaan Agregat**

Agregat ringan dari sumber yang berbeda akan mempunyai bentuk partikel dan tekstur permukaan yang berbeda-beda. Bentuk dan tekstur permukaan ini

akan mempengaruhi proporsi campuran beton, seperti workabilitas, rasio pasir terhadap agregat, kadar semen serta keperluan air.

## 2. Berat Jenis

Agregat ringan mempunyai struktur yang bersifat seluler sehingga berat jenisnya lebih rendah dari agregat normal. Agregat halus ringan mempunyai berat jenis yang lebih besar dari agregat kasar ringan. Berat jenis agregat kasar ringan berkisar antara  $1/3$ - $2/3$  dari berat jenis agregat normal. Dengan standar dari ASTM yang ada sekarang ini, sulit untuk menentukan secara tepat berat jenis dan daya absorpsi agregat ringan. Oleh karena itu dalam perhitungan *mix design* beton ringan, metode volume yang dalam perhitungannya berdasarkan pada berat jenis agregat, semen, air jarang digunakan.

## 3. Kandungan Air dan Daya Absorpsi Agregat

Daya absorpsi agregat ringan jauh lebih tinggi dari agregat normal karena sifatnya yang porous. Berdasarkan test absorpsi selama 24 jam, agregat ringan mampu menyerap 5%-20% berat agregat ringan kering, sedangkan agregat normal hanya menyerap 2% berat. Kandungan air pada agregat ringan sebagian besar terserap pada struktur dalam agregat, sedangkan pada agregat normal kandungan air terdapat pada permukaan agregat. Kecepatan absorpsi masing-masing agregat berbeda-beda tergantung dari keadaan kandungan air agregat tersebut.

## 4. Ukuran agregat

Ukuran maksimum agregat ringan umumnya yang digunakan adalah  $3/4$  inch (19 mm), atau  $1/2$  inch (13 mm), atau  $3/8$  inch (10 mm). Ukuran maksimum agregat ringan ini berpengaruh pada *workability*, rasio pasir terhadap agregat, kadar semen, kandungan udara optimum, tingkat kekuatan dan susut. Biasanya, kekuatan beton menjadi meningkat dengan memakai butiran agregat yang lebih kecil, apabila faktor-faktor tersebut ingin dibandingkan terhadap beton ringan dan beton normal, maka perbandingan harus dilakukan dengan memakai agregat dengan ukuran maksimum yang sama.

Tabel 2.1. Gradasi Agregat Ringan Untuk Beton Struktural

Ukuran (mm)	Persentase (berat) Lolos Ayakan Berukuran Lubang Persegi, mm								
	25.0	19.0	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3
<b>Agregat Halus</b>									
(4.75-0)	-	-	-	100	85-100	-	40-80	10-35	5-25
<b>Agregat Kasar</b>									
(25.0-4.75)	95-100	-	25-60	-	0-10	-	-	-	-
(19.0-4.75)	100	95-100	-	10-50	0-15	-	-	-	-
(12.5-4.75)	-	100	90-100	40-80	0-20	0-10	-	-	-
(9.5-2.36)	-	-	100	80-100	5-40	0-20	0-10	-	-
<b>Kombinasi Agregat Halus dan Kasar</b>									
(12.5-0)	-	100	95-100	-	50-80	-	-	5-20	2-15
(9.5-0)	-	-	100	90-100	68-90	35-65	-	10-25	5-15

Sumber : ASTM C.330-00

## 5. Kekuatan agregat

Agregat ringan umumnya lebih lemah dari agregat normal. Meskipun tidak ada hubungan yang pasti antara kekuatan agregat dan kekuatan beton yang akan dihasilkan, tetapi kekuatan beton yang sering tidak memenuhi syarat adalah beton dengan memakai agregat ringan.

### 2.2.2 Klasifikasi Agregat Ringan

Agregat ringan dapat diklasifikasikan menjadi 4, yaitu :

#### 1. Agregat ringan alami

Agregat ringan alami adalah agregat yang diperoleh dari bahan-bahan alami, seperti batu apung (*pumice*), skoria (*scoria*), *tuff*, *volcanic cinders*, yang semuanya termasuk batuan asli vulkanik.

#### 2. Agregat ringan struktural

Agregat ini dibuat melalui pembekahan (*expanded*) melalui proses pemanasan bahan-bahan seperti lempung (*clay*), batu sabak (*slate*), batu serpih (*shale*).

#### 3. Agregat ringan buatan untuk keperluan insulasi

Agregat ringan ini banyak digunakan untuk keperluan insulasi dan sangat ringan, agregat ini dibuat dari pembekahan diatomae (*diatomite*), perlit (*perlite*) dan vermikulit (*vermiculite*).

#### 4. Agregat dari penghancuran terak (*slag*), *cinders*

Mengacu pada SNI 03-2461-2002 agregat ringan dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu :

- Agregat ringan buatan yang merupakan hasil proses pengembangan, pemanasan atau sintering dari bahan terak tanur tinggi, lempung, diatome, abu terbang, batu sabak, batu obsidian;
- Agregat ringan alami diperoleh secara alami, seperti batu apung dan scoria, batu letusan gunung atau batuan lahar.

Dalam kurun waktu belakangan ini banyak dibuat beton ringan dengan bermacam-macam agregat ringan. Pemilihan terhadap pemakaian jenis agregat ringan ini tergantung dari jenis beton yang akan dihasilkan. Pada tabel 2.2 dapat dilihat sifat-sifat fisis agregat ringan yang digunakan sebagai campuran pembuatan beton ringan.

Tabel 2.2. Sifat-Sifat Fisis Agregat Ringan

Jenis Agregat	Berat Isi ( $kg/m^3$ )	Berat Jenis (SSD)	Daya Absorpsi (% berat)
Pumice	480-880	1.25-1.65	20-30
Foamed blast-furnace slag	400-1200	1.15-2.20	8-15
Expanded perlite	160	0.90-1.05	10-30
Expanded vermiculite	160	0.85-1.05	10-30
Expanded clay, shale, slate	560-960	1.1-2.1	2-15
Sintered fly ash	590-770	1.7	14-24
Saw dust	128-320	0.35-0.6	10-35
Polystyrene foam	10-20	0.05	30

Sumber : Popovics, Sandor., Concrete Making Material, 1979

### 2.3 BETON RINGAN (*LIGHTWEIGHT CONCRETE*)

Beton ringan agregat adalah beton ringan yang dibuat dengan memakai agregat ringan yang bersifat porous dan mempunyai berat jenis yang rendah (kurang dari 2.6). Berat isi beton yang dihasilkan adalah  $300-1850 \frac{kg}{m^3}$  dan kuat tekan antara  $0.3-0.4 MPa$ . Untuk membuat beton yang lebih ekonomis, dalam campuran beton ringan digunakan agregat halus normal, seperti pasir alam untuk menggantikan sebagian atau seluruh agregat halus ringan, beton jenis ini dikenal dengan sebutan "*sanded-lightweight concrete*". Campuran beton yang menggunakan agregat ringan untuk butiran halus dan kasarnya lebih dikenal

dengan sebutan “*all-lightweight concrete*”. Tujuan dari pemakaian agregat halus normal ini untuk meningkatkan kekuatan beton ringan, tingkat mudah dikerjakan (*workability*) dan nilai modulus elastisitas beton ringan tersebut.

Berdasarkan jenis agregat ringan yang digunakan, beton ringan dapat diklasifikasikan menjadi : [Waddel, Dobrowolski, 1994]

1. Beton ringan dengan berat jenis rendah (*low-density concretes*).

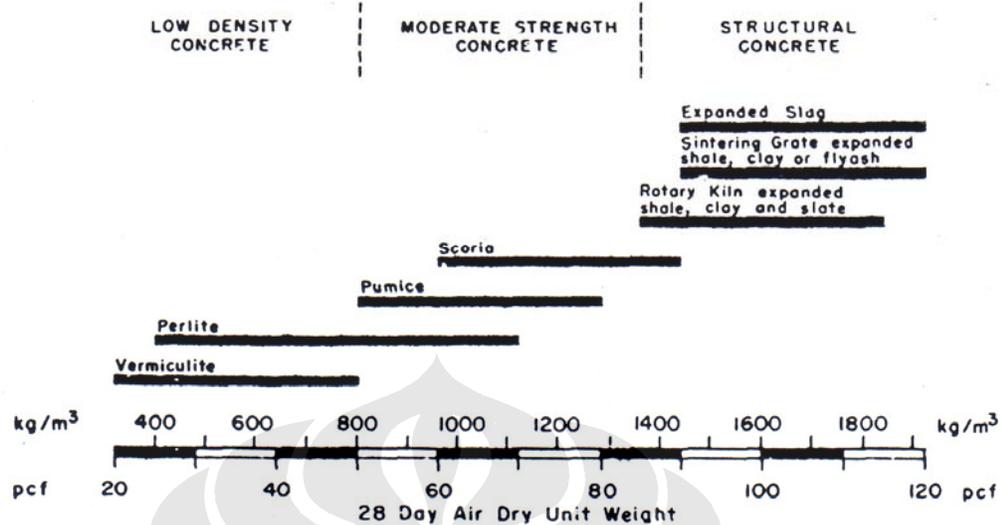
Beton ini sangat ringan sekali dan biasanya digunakan untuk insulasi dan sebagai peredam suara. Berat isinya kurang dari  $50 \text{ lb/ft}^3$  ( $800 \text{ kg/m}^3$ ) dengan kekuatan berkisar antara 220-1000 *psi* (0,69-6,89 *MPa*) dan daya hantar yang cukup rendah. Jenis agregat yang digunakan *perlite* dan *vermiculite*.

2. Beton ringan dengan kekuatan sedang (*moderate-strength light concrete*).

Beton ini biasanya digunakan sebagai bahan pengisi dan mempunyai kekuatan tekan antara 1000-2500 *psi* (6.89-17.24 *MPa*) dengan berat jenis antara 50-90  $\text{lb/ft}^3$  ( $800-1440 \text{ kg/m}^3$ ). Jenis agregat yang digunakan biasanya *pumice* dan *skoria*.

3. Beton ringan struktural (*struktural lightweight concretes*)

Beton ringan ini digunakan untuk bangunan yang bersifat struktural dengan daya hantar panas yang rendah dari beton normal walaupun lebih tinggi dari beton ringan dengan densitas rendah. Beton ini mempunyai kekuatan tekan lebih dari 2500 *psi* (17,24 *MPa*) dengan berat isi maksimum  $115 \text{ lb/ft}^3$  ( $1840 \text{ kg/m}^3$ ). Untuk mencapai kekuatan tersebut di atas maka butiran halus ringan pada campuran beton diganti dengan pasir alam. Jenis agregat yang digunakan antara lain *expanded shale*, *clays*, *slates* dan *slag*.



Gambar 2.1. Klasifikasi Beton Ringan Berdasarkan Berat Isi Beton  
Sumber: ACI Committee 213R-79, Manual of Concrete Practice, 1979

### 2.3.1 Sifat Mekanis Beton Ringan

Berikut ini merupakan sifat-sifat mekanis dari beton ringan untuk beton keras (*hard concrete*), yaitu :

#### 1. Kekuatan tekan

Kuat tekan dari beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

1. Jenis semen dan kualitasnya.
2. Jenis dan lekak-lekuk bidang permukaan agregat.
3. Kualitas dari perawatan (*curing*).
4. Suhu ikat.
5. Umur.

Tingkat kekuatan beton yang dibutuhkan untuk memenuhi kekuatan dengan cara beton cast-in-place, pre-cast, pre-stress dapat diperoleh dengan memakai agregat ringan, kekuatan tekan 28 hari beton ringan umumnya adalah 20,68-34,47 MPa. Setiap agregat mempunyai kekuatan batas (*strength ceiling*) tetapi batas kekuatan ini dapat dinaikkan, yaitu dengan cara mengurangi ukuran butiran maksimum agregat untuk kadar semen dan nilai slump yang sama. Contoh, dengan memakai agregat ringan berukuran maksimum  $\frac{3}{4}$  inch, akan diperoleh beton berkekuatan 37,92 MPa. Tetapi apabila memakai agregat kasar

ringan berukuran maksimum  $\frac{1}{2}$  inch atau  $\frac{3}{8}$  inch, batas kekuatan beton ringan tersebut akan meningkat sebesar 44,81-48,25 MPa.

Kekuatan tekan beton ringan lebih tergantung pada kandungan semen dengan nilai slump tertentu dari ratio air-semen. Penambahan air tanpa diikuti dengan penambahan semen pada campuran beton akan meningkatkan nilai slump. Pemakaian *Air-Entrape Agent* pada campuran beton ringan juga sangat menguntungkan. Pada tabel 2.1 dapat dilihat kadar semen yang diperlukan untuk memperoleh kekuatan tekan rata-rata beton pada umur 28 hari.

Dalam beberapa hal, kekuatan tekan beton ringan dapat ditingkatkan dengan mengganti sebagian atau seluruh agregat halus ringan dengan memakai agregat halus normal, pasir alam. Dimana dengan pemakaian agregat halus normal dapat meningkatkan berat isi (*density*).

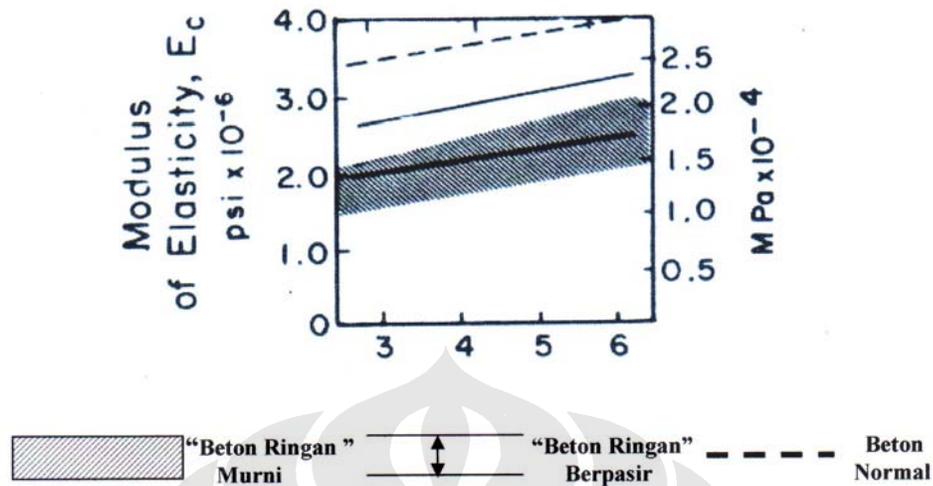
Tabel 2.3. Hubungan Kekuatan Tekan Rata-rata dengan Kandungan Semen

<b>Kekuatan Tekan</b> <i>Psi (MPa)</i>	<b>Kandungan Semen (<math>kg/m^3</math>)</b>	
	<b>All lightweight</b>	<b>Sanded lightweight</b>
2500 (17,24)	237-303	237-303
3000 (20,08)	261-332	249-332
4000 (27,58)	314-392	291-392
5000 (34,47)	374-445	356-445
6000 (41,37)	439-498	415-498

Sumber: ACI Committee 213R-79, Manual of Concrete Practice, 1979

## 2. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton tergantung dari jumlah mortar semen dan agregat serta nilai modulus dari masing-masing bahan pembentuknya. Beton normal mempunyai nilai modulus elastisitas yang lebih besar karena nilai modulus dari pasir dan kerikil lebih besar dari modulus agregat ringan struktural. Pada gambar 2.2 dapat dilihat nilai modulus elastisitas dari beton "*all lightweight*" dan beton "*sand lightweight*". Dari gambar tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai modulus elastisitas untuk beton ringan berpasir lebih besar dari beton ringan murni.



Gambar 2.2. Modulus Elastisitas Beton Ringan  
Sumber: ACI Committee 213R-79, Manual of Concrete Practice, 1979

Umumnya modulus elastisitas beton ringan berkisar antara  $\frac{1}{2}$  -  $\frac{3}{4}$  dari beton normal yang berkekuatan sama. Perbedaan gradasi agregat tidak berpengaruh pada nilai modulus elastisitas beton ringan apabila volume relatif dari pasta semen dan agregat tidak ditambah.

ACI-code merekomendasikan rumus umum untuk menghitung nilai modulus elastisitas beton ( $E_c$ ) sebagai berikut :

$$E_c = w_c^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f_c} \quad (2-1)$$

Dimana :

$E_c$  = Modulus Elastisitas Beton (MPa)

$w_c$  = Berat isi beton (1440-2480  $kg/m^3$ )

$f_c$  = Kuat tekan

### 3. Rangkak (*creep*)

Struktur beton berintensitas beban rendah akan menghasilkan deformasi dalam daerah elastis, tetapi lambat laun deformasi ini akan bertambah menurut lamanya pembebanan meskipun kondisi beban tersebut konstan. Gejala ini disebut sebagai rangkak (*creep*). Sehingga rangkak adalah perubahan bentuk yang non-elastis di bawah suatu pembebanan tetap dalam waktu tertentu. Rangkak diduga disebabkan oleh penutupan pori-pori dalam aliran dari gel semen karena adanya

tekanan. Deformasi akibat rangkakan dapat beberapa kali lebih besar dari pada defoermasi akibat pembebanan awal. Besar kecilnya rangkakan ini tergantung baik pada kondisi material, misalnya rasio air-semen, jenis semen, jenis agregat, maupun pada kelembapan lingkungan, dimensi atau ukuran beton dan ada tidaknya adiktif. Dalam kondisi lembab, dimana kehilangan air dalam beton rendah, nilai rangkakan juga akan rendah.

Adanya rangkakan tidak terlalu mempengaruhi kekuatan elemen struktur, tetapi redistribusi tegangan elemen dan defleksi yang lebih besar dapat terjadi. Tegangan beton akibat beda penurunan titik (*differential settlement*) dapat berkurang karena adanya rangkakan. Sebenarnya rangkakan dan susut saling berkaitan (saling bergantung), tetapi untuk mempermudah perhitungan umumnya kedua gejala ini ditinjau secara terpisah sehingga dapat ditambahkan satu sama lain.

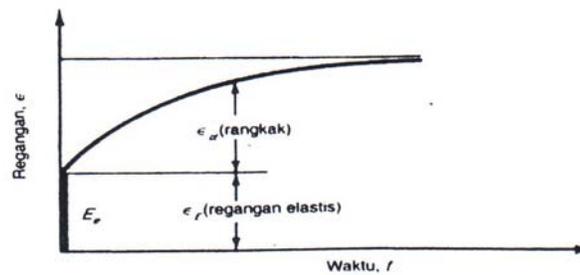
Rangkakan tidak dapat langsung dilihat hanya dapat diketahui apabila regangan elastis, susut serta deformasi (regangan) totalnya diketahui. Meskipun susut dan rangkakan adalah fenomena yang saling terkait, dapat dianggap berlaku superposisi regangan, yaitu regangan total adalah penambahan antara regangan elastis, susut serta rangkakan. Secara matematis dalam persamaan berikut :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_c + \varepsilon_{sh} \quad (2-2)$$

Dimana :

- $\varepsilon_t$  = Regangan Total
- $\varepsilon_e$  = Regangan Elastis
- $\varepsilon_c$  = Regangan Rangkakan
- $\varepsilon_{sh}$  = Regangan Susut

Rangkakan sangat berkaitan dengan susut dan sebagai aturan umum beton yang menahan susut juga cenderung mengalami sedikit rangkakan, karena kedua fenomena tersebut berkaitan dengan pasta semen yang terhidrasi. Dengan demikian, rangkakan dipengaruhi oleh komposisi beton, kondisi lingkungan dan ukuran benda uji, tetapi secara prinsip rangkakan bergantung pada pembebanan sebagai fungsi waktu. Pada gambar 2.3 dapat dilihat hubungan antara waktu dengan regangan pada beton.



Gambar 2.3. Hubungan antar Waktu dengan Regangan Beton  
 Sumber : Nawy, Edward. G., Reinforced Concrete- A Fundamental Approach, 1990

### 2.3.2 Klasifikasi Beton Ringan

Berdasarkan proses pembuatannya, beton ringan dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

#### 1. Beton ringan agregat

Beton ringan agregat adalah beton ringan yang dibuat dengan memakai agregat ringan yang bersifat porous dan mempunyai berat jenis yang rendah (kurang dari 2.6). berat isi beton yang dihasilkan adalah  $300-1850 \text{ kg/m}^3$  dan kuat tekan antara  $0.3-0.4 \text{ MPa}$ . Agregat ini diperoleh dengan jalan pembekahan lempung, batu sabak, batu serpih, perlit, vermikulit. Adapula agregat ringan yang diperoleh secara alami, seperti pumice, scoria, tuff. Kadang kala dalam membuat beton yang lebih ekonomis, dalam campuran beton ringan digunakan agregat halus normal, seperti pasir alam untuk menggantikan sebagian atau seluruh agregat halus ringan, beton jenis ini lebih dikenal dengan sebutan “*sanded-lightweight concrete*”. Campuran beton yang menggunakan agregat ringan untuk butiran halus dan kasarnya lebih dikenal dengan sebutan “*all-lightweight concrete*”. Tujuan dari pemakaian agregat halus normal ini untuk meningkatkan kekuatan beton ringan, tingkat mudah dikerjakan (*workability*) dan nilai modulus elastisitas beton ringan tersebut.

#### 2. Beton aerasi

Beton ini dibuat dengan memberikan gelembung udara ke dalam mortar sehingga campuran beton menghasilkan banyak rongga udara, dengan berat isi berkisar antara  $200-1100 \text{ kg/m}^3$ . Jenis beton ringan ini biasanya digunakan untuk keperluan insulasi.

### 3. Beton tanpa agregat halus (*no-fines concrete*)

Beton yang dibuat tanpa agregat halus, melainkan hanya memakai agregat kasar. Sehingga beton yang dihasilkan banyak mengandung rongga. Berat isi dari beton jenis ini tergantung dari gradasi agregatnya. Dengan hanya memakai satu ukuran butiran, beton yang dihasilkan akan mempunyai berat isi 10% lebih rendah dari berat isi beton yang memakai agregat bergradasi baik. Ukuran agregat yang dipakai besarnya antara 10-20 mm. Berat isi beton apabila memakai agregat ringan bisa mencapai  $640 \text{ kg/m}^3$  dan  $1600\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$  bila memakai agregat normal. Kekuatan tekan *no-fines concrete* yang dihasilkan adalah 1,4-14 MPa tergantung dari berat isinya, yang juga dipengaruhi oleh kadar semennya.

Pada dasarnya pengurangan berat isi dari beton ringan yang dihasilkan dari masing-masing cara tersebut adalah karena adanya rongga-rongga udara, baik di dalam agregat, mortar, maupun antara partikel agregat kasar. Adanya rongga-rongga ini akan mengurangi kekuatan dari beton ringan tersebut., tetapi dengan adanya rongga-rongga ini membuat beton ringan mempunyai daya insulasi panas yang baik.

## 2.4 POLYETHYLEN TEREPHTHALATE (PET)

*Polyethylene terephthalate* (PET) merupakan polyester termoplastik yang diproduksi secara komersial melalui produk kondensasi yang dikarakterisasi dengan banyaknya ikatan ester yang didistribusikan sepanjang rantai utama polimer. *Poyethylene terephthalate* (PET) adalah bahan dasar dari botol minuman plastik, dengan nama IUPAC-nya *polioksi etilen neooksitereftaol*.

Proses pembuatan PET memerlukan suhu yang sangat tinggi di atas  $100^\circ\text{C}$  untuk produk yang secara komersial memiliki kemampuan kristalisasi cepat. Material ini memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap pelarut yang bagus, dan stabilisasi hidrolitiknya baik [Ehrig, R.J.,1993].

PET dan poliester lain pada umumnya bebas dari hasil pembakaran berbahaya  $\text{CO}_2$ . Titik leleh PET murni di aast  $280^\circ\text{C}$  untuk sampel yang “*annealing*” secara lengkap. Sedangkan produk komersialnya meleleh pada suhu  $255^\circ\text{C}\text{-}265^\circ\text{C}$ , karena hasil kristalisaai berkurang dengan adanya pengotor pada

rantai utamanya. Pengotor yang ada dalam PET mengakibatkan kekuatan produk akan berkurang, baik sebagai produk film atau serat. Titik transisi gelas bervariasi dalam interval yang luas tergantung pada kemurnian polimernya [Young J.F., Mindness, S., Bentur, A].

*Polyethylene terephthalate* (PET) secara komersial di sintesa dari etilen glikol (EG) dan *dimethyl terephthalate* (DMT) melalui esterifikasi langsung dengan asam terephthalate (TPA) dan memiliki lebih banyak gugus dietilen glikol dari pada PET yang dibuat dengan proses trans esterifikasi. Polimerisasi terjadi melalui 2 tahap, yaitu pertukaran ester dan tahap polimerisasi.

*Polyethylene terephthalate* (PET) dapat larut dalam m-cresol panas, asam trifluoroasetat, oklorofenol, memiliki titik leleh kristalin yang cukup tinggi sekitar  $270^{\circ}\text{C}$  dan sifat mekanik yang baik, tahan terhadap perlakuan kimia, hidrolitik dan pelarut. PET digunakan juga dalam teknik pemlastik sebagai pengganti baja, aluminium dalam pembuatan bahan elektronik.

Sifat – sifat fisik dari *Polyethylene terephthalate* (PET) [Derucher, K.N., Heins, C.P., 1981], sebagai berikut :

- a. specific gravity : 0.92
- b. Konduktivitas Thermal :  $8 \times 10^{-4} \text{ cal / (sec) (cm}^3 \text{) (}^{\circ}\text{C)}$
- c. Ekspansi thermal :  $(16-18) \times 10^{-5} \text{ in./in. }^{\circ}\text{C}$
- d. Water absorption :  $< 0.01$
- e. Terdiri atas beberapa warna
- f. Umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan : botol, kabel listrik.

Sifat – sifat mekanik dari *Poyethylene terephthalate* (PET) [Derucher, K.N., Heins, C.P., 1981], sebagai berikut :

- a. Kuat tarik (*tensile strength*) :  $(1.5-1.8) \times 10^3 \text{ psi}$
- b. Kuat tekan (*compressive strength*) : -
- c. Modulus elastisitas (*modulus of elasticity*) :  $0,19 \times 10^5 \text{ psi}$
- d. Kuat tumbuk (*Impacts strength*) :  $< 16 \text{ ft-lb/in.s}$

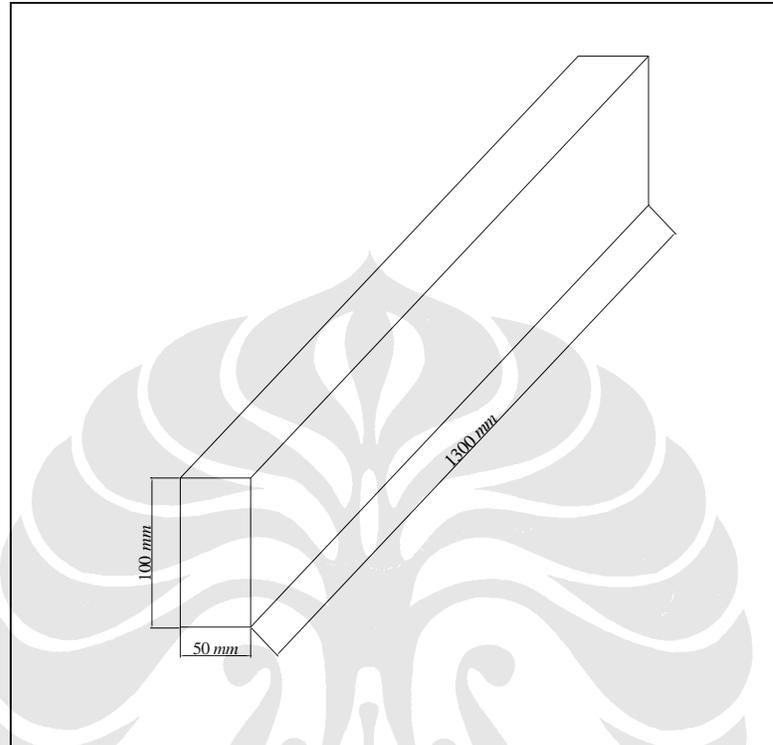
Agregat kasar ringan dari limbah botol plastik (PET) dapat sebagai alternatif pengganti agregat kasar ringan pada umumnya yang digunakan dalam campuran beton ringan struktural, baik ditinjau dari segi kekuatan dan keekonomisan. [Wiryawan, S., A., 2007].

Berdasarkan pada standar mutu dan syarat pengujian ASTM C300-00, “*Standard Specification for Lightweight for Structural Concrete*”, dan SNI 03-2461-1991, “Spesifikasi Agregat Ringan Untuk Beton Struktur”, yang dilakukan terhadap agregat ringan kasar buatan dari limbah botol plastik *PET* bahwa agregat ringan kasar buatan dari limbah plastik dapat digunakan sebagai agregat ringan dalam campuran beton ringan. [Setyowati, S., D., 2007].

## 2.5 TEORI BALOK *BERNOULLI*

Menurut Gere & Timoshenko, balok adalah batang yang dikenakan beban-beban yang bekerja secara transversal terhadap sumbu pemanjangannya. Model klasik balok tipis (sering dikaitkan dengan nama *Navier*, *Bernoulli* dan *Euler*) yang mengabaikan pengaruh deformasi geser transversal. Hal ini terjadi karena adanya rasio antara panjang bentang dan lebar bentang pada balok sangatlah besar, dimana pada balok *Bernoulli* :  $h = \frac{1}{12}L$ . Medan peralihan berbasiskan pada hipotesis : “*penampang normal tetap normal*”, sehingga pada balok ini luas penampang (*A*) yang ada tidaklah berubah. Dapat dikatakan bahwa pada balok *Bernoulli*, momen yang bekerja lebih dominan dibandingkan dengan tegangan gesernya.

Permodelan pada balok Bernoulli :



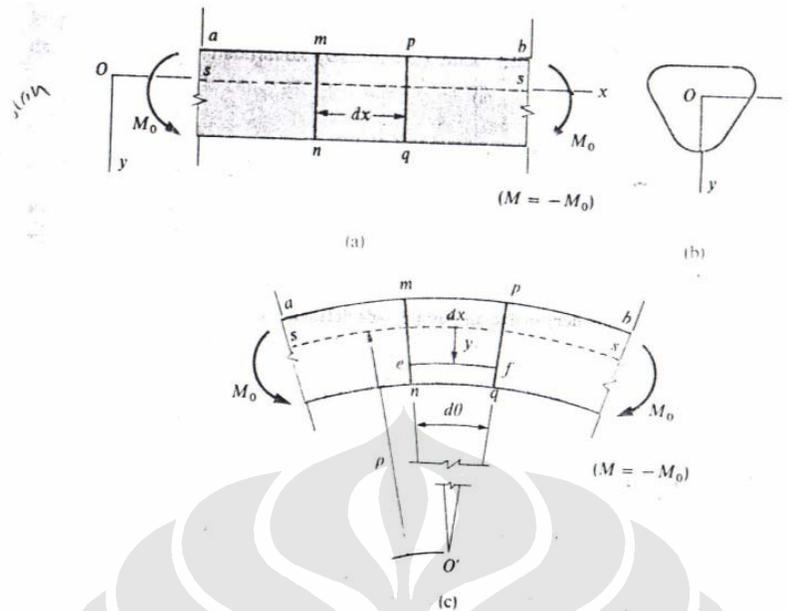
Gambar 2.4. Permodelan Balok *Bernoulli*

Nilai  $h$  untuk balok tersebut terbentang antara :  $h = \frac{1}{12}L - \frac{1}{14}L$ , sedangkan untuk

nilai  $b$  terbentang antara :  $b = \frac{1}{2}h - \frac{1}{3}h$ .

### 1. Regangan Normal dalam Balok

Untuk mendapatkan regangan internal dalam balok, kita harus meninjau kelengkungan balok dan deformasi-deformasi yang bersangkutan.



Gamb. 5-6. Deformasi-deformasi dari sebuah balok yang mengalami lentur murni yang dihasilkan oleh kopel-kopel  $M_0$ . (Catatan: Momen lentur  $M$  sama dengan  $-M_0$ .)

Gambar 2.5. Deformasi dari sebuah Balok

Sumber : Gere & Timoshenko, Mekanika Bahan Edisi Kedua Versi SI Jilid 1, 1987

Bidang-bidang penampang  $mn$  dan  $pq$  dari balok yang terdeformasi memotong sebuah garis yang melalui pusat kelengkungan  $O'$ . Sudut antara bidang-bidang ini ditunjukkan oleh  $d\theta$ , dan jarak dari  $O'$  ke permukaan netral adalah jari-jari kelengkungan  $\rho$ . Jarak semula  $dx$  antara kedua bidang tak berubah pada permukaan netral, karena itu,  $\rho d\theta = dx$ . Tetapi serat-serat longitudinal lainnya ada yang diperpanjang atau diperpendek, sehingga dengan demikian menciptakan regangan-regangan longitudinal  $\epsilon_x$ . Untuk menghitung regangan-regangan ini, tinjau suatu serat pemanjangan khas  $ef$  yang terdapat dalam balok pada jarak  $y$  dari permukaan netral. panjang  $L_1$  dari serat ini adalah

$$L_1 = (\rho - y)d\theta = dx - \frac{y}{\rho} dx \quad (2-3)$$

Karena panjang semula dari  $ef$  adalah  $dx$ , maka dari sini diperoleh bahwa pemanjangannya adalah  $L_1 - dx$  atau  $-\frac{y dx}{\rho}$ . Regangan yang bersangkutan sama dengan pemanjangan dibagi oleh panjang semula  $dx$ ; karena itu :

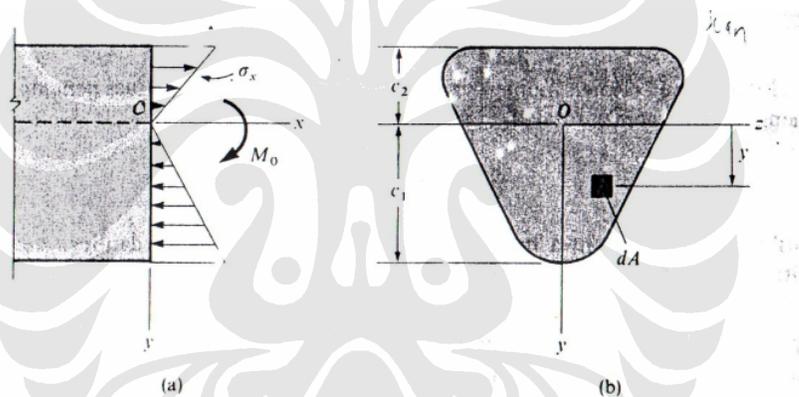
$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} = -ky \quad (2-4)$$

dimana  $k$  adalah kelengkungan.

## 2. Tegangan Normal dalam Balok

Kita dapat peroleh tegangan-tegangan  $\sigma_x$  yang bekerja dalam arah normal terhadap penampang sebuah balok dari regangan normal  $\epsilon_x$ . Tiap –tiap serat longitudinal sebuah balok hanya dikenakan tarik dan tekan (yaitu, serat – serat dalam tegangan uniaksial); karena itu diagram tegangan-regangan akan memberikan hubungan antara  $\sigma_x$  dan  $\epsilon_x$ . Jika bahannya elastis dengan suatu diagram tegangan-regangan linier, maka kita dapat menggunakan hukum Hooke untuk tegangan uniaksial ( $\sigma = E \epsilon$ ) dan diperoleh

$$\sigma_x = E \epsilon_x = -Eky \quad (2-5)$$



**Gamb. 5-10.** Penyebaran tegangan normal  $\sigma_x$  dalam sebuah balok dari bahan/elastis linier

Gambar 2.6. Penyebaran Tegangan Normal  $\sigma_x$

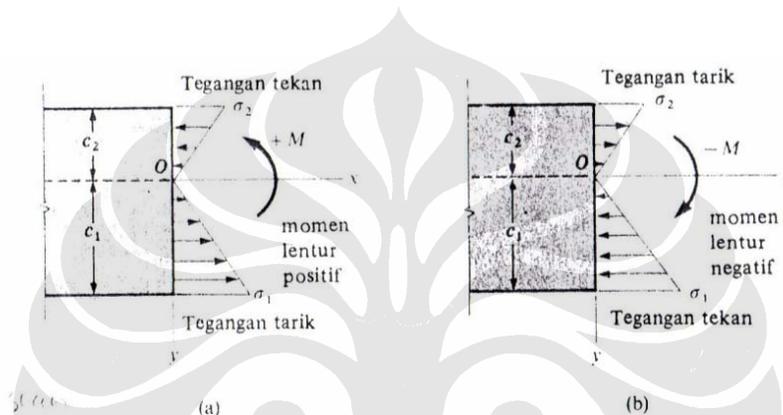
Sumber : Gere & Timoshenko, Mekanika Bahan Edisi Kedua Versi SI Jilid 1, 1987

Jadi, tegangan-tegangan normal yang bekerja pada penampang berubah secara linier terhadap jarak  $y$  dari permukaan netral. Bila kita meninjau resultan momen dari tegangan-regangan  $\sigma_x$  yang bekerja pada penampang, akan menghasilkan momen lentur dari luas penampang terhadap sumbu  $z$  (yaitu, terhadap sumbu netral). Sehingga memiliki persamaan sebagai berikut :

$$k = \frac{1}{\rho} = -\frac{M}{EI} \quad (2-6)$$

yang memiliki dimensi panjang pangkat empat. Persamaan di atas memperlihatkan bahwa kelengkungan sumbu longitudinal balok sebanding dengan momen lentur  $M$  dan berbanding terbalik dengan besaran  $EI$ , yang dikenal sebagai ketegaran lentur (*flexural rigidity*) balok. Tegangan –tegangan normal dalam balok berhubungan dengan momen lentur. Hubungan ini diperoleh dengan menghasilkan persamaan :

$$\sigma_x = \frac{My}{I} \quad (2-7)$$



Gamb. 5-12. Hubungan antara tanda-tanda dari momen lentur dan tegangan normal (Pers. 5-10).

Gambar 2.7. Hubungan Momen Lentur dan Tegangan Normal

Sumber : Gere & Timoshenko, Mekanika Bahan Edisi Kedua Versi SI Jilid 1, 1987

Analisis tegangan-tegangan normal dalam balok-balok di atas hanya menyangkut lentur murni, yang berarti bahwa tidak ada gaya-gaya lintang yang bekerja pada penampang.

### 2.5.1 Hubungan Desain Awal

Menurut James Mac Gregor, gambar 2-8a menggambarkan balok yang menahan berat sendirinya,  $w$ , ditambah beberapa beban luar terpusat tambahan,  $P_1$ ,  $P_2$ , dan  $P_3$ . Ini diakibatkan oleh momen bending yang didistribusikan seperti Gambar 2-8b. Momen bending secara langsung didapat dari beban-beban menggunakan hukum static, dan untuk bentang yang diberikan dan kombinasi beban,  $w$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ , dan  $P_3$ , diagram momen tidak bergantung pada komposisi atau ukuran dari balok. Momen bending ditujukan sebagai pengaruh beban. Akibat

pembebanan yang lainnya adalah gaya lintang, gaya normal, torsi, lendutan dan getaran.

Gambar 2-9a menunjukkan tegangan runtuh berperan pada balok yang melintang. Tegangan tekan dan tegangan tarik pada Gambar 2-9a dapat digantikan dengan penjumlahan keduanya,  $C$  dan  $T$ , seperti pada Gambar 2-9b. penjumlahan pasangan biasa disebut gaya dalam momen. Gaya dalam momen terjadi ketika bagian melintang ditunjukkan jatuh sebagai kapasitas momen atau gaya dalam momen. Kata “gaya dalam” dapat juga digunakan untuk menjelaskan gaya dalam lintang atau gaya dalam normal.

Balok pada Gambar 2-9 dapat menahan beban sepanjang bentang jika setiap bagian dari bentang memiliki gaya dalam melampaui beban yang ada :

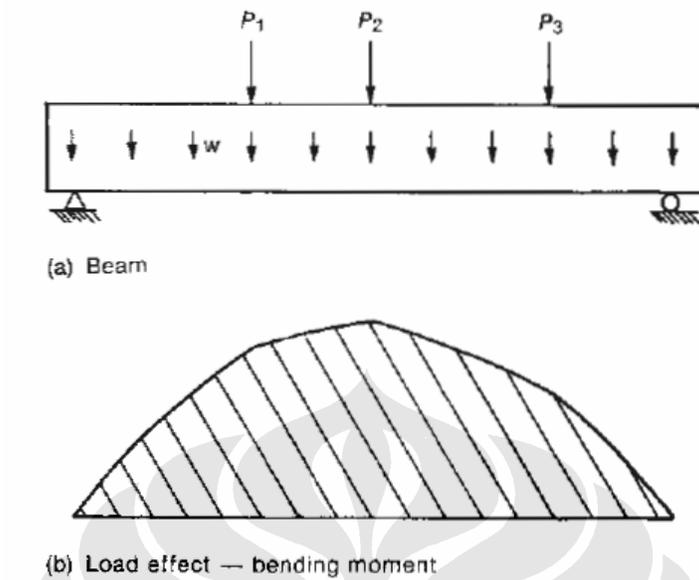
$$\text{perlawanan} \geq \text{pengaruh beban} \quad (2-8)$$

Untuk memberikan kemungkinan bahwa gaya dalam ini mungkin kurang dari perhitungan, dan pengaruh beban mungkin lebih besar dari perhitungan, dan pengaruh beban mungkin lebih besar dari perhitungan, *factor reduksi kekuatan tekan*,  $\phi$ , kurang dari 1, dan *factor beban*,  $\alpha$ , lebih dari 1, sebagai berikut :

$$\phi R_n \geq \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots \quad (2-9)$$

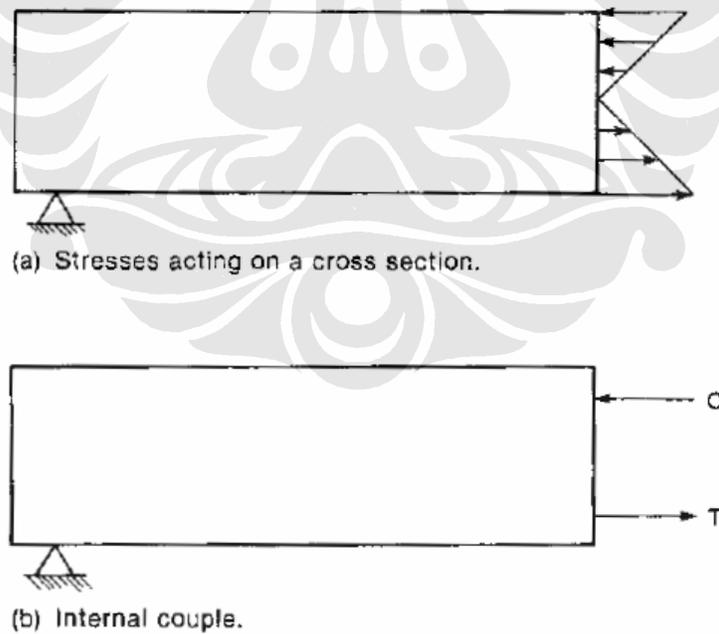
dimana  $R_n$  diperuntukkan perlawanan nominal dan  $S$  diperuntukkan pengaruh beban berdasarkan spesifikasi dari beban. Tertulis dalam batas dari momen, Pers. 2-9 menjadi :

$$\phi_M M_n \geq \alpha_D M_D + \alpha_L M_L + \dots \quad (2-10)$$



Gambar 2.8. Beban-Beban dan Gaya Dalam Momen

Sumber : MacGregor, James. G, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, 1997



Gambar 2.9. Gaya Dalam Momen

Sumber : MacGregor, James. G, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, 1997

dimana  $M_n$  adalah gaya dalam momen nominal. Kata “nominal” berarti bahwa gaya dalam ini adalah nilai perhitungan berdasarkan pada spesifikasi beton dan kekuatan baja dan ukuran-ukuran seperti pada gambar.  $M_D$  dan  $M_L$  adalah momen bending (pengaruh beban) akibat spesifikasi beban mati dan spesifikasi beban hidup, secara masing-masing;  $\phi_M$  adalah factor reduksi kekuatan untuk momen;  $\alpha_D$  dan  $\alpha_L$  adalah factor beban untuk beban mati dan beban hidup, secara masing-masing. Faktor reduksi kekuatan kadang-kadang ditunjukkan sebagai *factor gaya dalam*.

Persamaan yang sama dapat dituliskan untuk lintang,  $V$ , atau gaya tekan,  $P$ , :

$$\phi_V V_n \geq \alpha_D V_D + \alpha_L V_L + \dots \quad (2-11)$$

$$\phi_P P_n \geq \alpha_D P_D + \alpha_L P_L \dots \quad (2-12)$$

Persamaan 2-8 adalah batas awal persamaan desain. Persamaan 2-10 adalah bentuk khusus dari persamaan dasar ini. Persamaan 11-1 pada kode ACI, sebagai contoh, adalah sama seperti persamaan 2-11 kecuali bahwa ini ada dipersamaan, batasan dari grup ( $\alpha_D V_D + \alpha_L V_L + \dots$ ) disimbolkan sebagai  $V_u$ , yang mana diperuntukkan sebagai factor gaya lintang. Seluruh kode ACI, symbol  $U$  digunakan untuk menunjukkan kombinasi ( $\alpha_D D + \alpha_L L + \dots$ ). Kombinasi ini ditunjukkan sebagai kekuatan yang dianjurkan atau *beban terfaktor*. Symbol  $M_u$ ,  $V_u$ ,  $T_u$ , dan seterusnya, ditunjukkan untuk pengaruh beban terfaktor dihitung dari factor beban,  $U$ , oleh karena turunan  $u$ .

### 2.5.2 Kurva Elastisitas Balok

Menurut R. Kinasoshvili, garis sumbu lurus pada balok melendut akibat dari beban luar yang diberikan pada balok. Lendutan garis sumbu pada balok disebut kurva elastis. Pengertian kurva elastis pada balok sangat penting sejak kurva ini sering dibutuhkan tidak hanya tegangan dalam pada balok yang seharusnya tidak melebihi tegangan yang diijinkan tetapi juga lendutan maksimum pada balok yang seharusnya tidak melebihi nilai keadaan yang ada berdasarkan kondisi perlakuan pada balok. Di samping itu, desain pada balok tak support secara static, sebagai contoh, balok dengan jumlah reaksi yang lebih besar

pada kondisi static, persamaan yang ada diberikan oleh turunan persamaan lendutan.

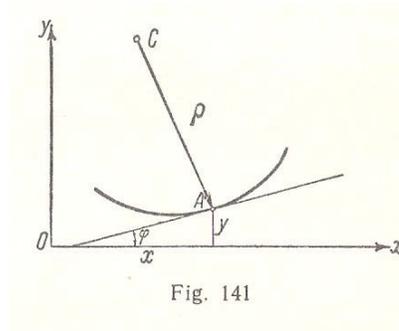
Pada analisa tegangan yang disebabkan oleh bending, dapat diformulasikan secara:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad \text{atau} \quad \rho = \frac{EI}{M} \quad (2-13)$$

Dimana persamaan ini menggambarkan teori lentur. Pada kata-kata dalam formula ini dapat dibaca sebagai radius dari kelengkungan  $\rho$  di setiap titik pada kurva elastis pada balok yang secara langsung sejajar pada kekakuan  $EI$  dan secara terbalik proporsional pada momen bending. Jika balok dipasangkan, momen  $M$  konstan kepada panjang dan jari-jari dari kurvatur dan juga konstan, sebagai contoh, kurva elastis pada balok berbentuk busur lingkaran. Pada sebab yang lainnya kurva elastis mungkin memiliki bentuk yang berbeda. Untuk menjelaskan persamaan pada kurva elastis pada koordinat disetiap titik segi empat, kita setuju untuk secara langsung bahwa sumbu  $x$  selalu sejajar garis sumbu pada balok ke arah kanan dan sumbu  $y$  secara vertical ke atas. Persamaan pada kurva elastis harus diberikan hubungan antara koordinat  $x$  dan  $y$  pada titiknya. Dengan adanya hubungan ini, ini memungkinkan untuk menemukan korespondensi lendutan  $y$  untuk setiap titik pada balok sejauh jarak  $x$  dari titik awal.

Pada matematika, dibawah ini menggambarkan turunan untuk jari-jari kelengkungan pada titik A dengan koordinat  $x, y$ :

$$\rho = \pm \frac{\left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2 y}{dx^2}} \quad (2-14)$$



Gambar 2.10. Jari-Jari Kelengkungan  
Sumber : Kinasoshvili.R, *Strength of Materials*, 1978

Persamaan ini menggambarkan untuk jari-jari kelengkungan mungkin dapat digantikan dengan penggambaran pendekatan sederhana. Intinya adalah lendutan ijin pada balok dipengaruhi oleh kecilnya bending (sekitar seribu dari bentang balok) dan kurva elastistas berbeda hanya sedikit dari garis lurus. Kuantitas  $\frac{dy}{dx}$  yang mana merepresentasikan  $\tan \varphi$ , sebagai contoh, kemiringan dari sudut pada garis kemiringan pada kurva elastis membuat sumbu  $x$  positif, kecilnya sehingga disamakan dengan nilai menjadi tidak ada perbandingan dengan keseluruhannya yang ditambahkan. Karena kecilnya nilai  $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$  dapat diabaikan. Kesalahan yang ditampilkan pada nilai dari jari-jari kelengkungan tidak melebihi 0,5%. Pada kasus jari-jari kelengkungan pada kurva elastisitas pada balok dapat digambarkan secara mudah:

$$\rho = \pm \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (2-15)$$

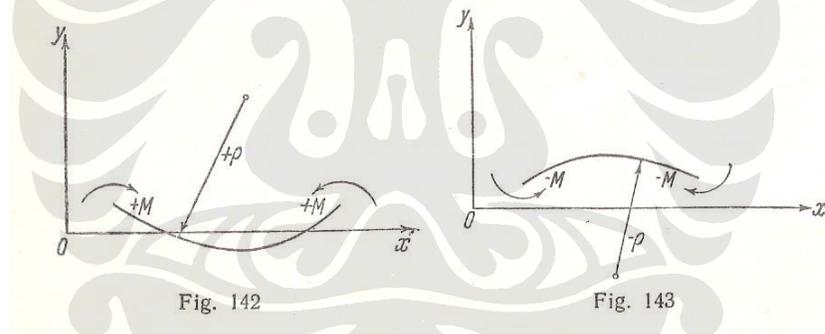
Mengganti nilai pada  $\rho$  ini pada Persamaan 2-13, kita memperoleh persamaan dari kurva elastisitas pada bentuk (bentuk berbeda)

$$\pm EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (2-16)$$

Adanya dua tanda pada sisi kiri Persamaan (2-16) sangat penting untuk membedakan pada sisi kiri atau sisi kanan agar selalu konsisten. Pilihan tanda pada sisi kiri diperintahkan oleh arah relative pada kurva elastisitas dan sumbu

Oy; tanda pada sisi kanan merupakan momen. Jika kurva berbentuk cekung terhadap sumbu  $y$  positif (Gambar 2.11), maka  $\rho > 0$  sejak  $\frac{d^2y}{dx^2} > 0$ , dan sebaliknya jika cekung terhadap sumbu  $y$  negative (Gambar 2.11), maka  $\rho < 0$  sejak  $\frac{d^2y}{dx^2} < 0$ . Ini, jika kita sepakati untuk memilih arah positif pada sumbu  $y$  ke atas, arah pada  $\rho$  (atau  $\frac{d^2y}{dx^2}$ ) akan bersamaan dengan tanda pada momen bending, yang dengan mudah dapat diteliti dari penjabaran pada Gambar 2.11. Dari sini mengikuti kedua gambar itu, jika koordinat sumbu dipilih sebagai keadaan di atas, persamaan kurva elastis dapat dituliskan pada bentuk umum seperti

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (2-17)$$



Gambar 2.11. Arah-Arah Kelengkungan pada Kurva Elastis  
 Sumber : Kinasoshvili.R, *Strength of Materials*, 1978

Untuk memperoleh persamaan kurva elastisitas pada bentuk yang diberikan secara langsung antar lendutan  $y$  dan absis  $x$ , ini menjadi penting untuk mengintegrasikan Persamaan (2-17) dua kali. Integral pertama persamaan hubungan yang ada kemiringan sudut  $\left(\frac{dy}{dx}\right)$ , itu merupakan garis kemiringan pada elemen kurva elastis yang didapat bersama sumbu  $x$ , untuk absis dari elemen. Integral kedua menunjukkan persamaan kurva elastis pada bentuk yang diberikan langsung berhubungan dengan lendutan  $y$  dan absis  $x$ . Setelah integral akan keluar

hasil. Lalu, kita mendapatkan dua konstanta integral pada setiap bagian balok setelah dua kali integral persamaan kurva elastis.

Ketika jumlah bagian pada balok melebar, metode ini memasukkan solusi system persamaan dengan jumlah besar konstanta-konstanta yang tidak diketahui. Konstanta-konstanta ini ditentukan dari persamaan lendutan dan putaran sudut pada batas-batas dari bagian yang berdekatan dan dari kebiasaan perletakan balok. Akan tetapi, berpegang pada hukum yang berlaku dan prosedur pemasangan dan integral persamaan momen bending pada bagian yang terpisah, ini selalu mungkin untuk mengurangi jumlah yang tidak diketahui menjadi dua. Ini merupakan cara termudah menyelesaikan masalah untuk menemukan kurva elastis pada balok yang memiliki beberapa bagian.

Untuk memulainya, kita setuju untuk memilih koordinat awalnya pada sisi ujung balok dengan  $x$  positif ke arah kanan dan  $y$  positif ke atas. Dalam menghitung momen kita harus berdasarkan pada bagian balok yang merupakan awalnya, sebagai contoh, kita harus selalu menentukan momen yang diberikan mendekati sisi kiri balok.

Sekarang kita proses untuk menjelaskan tiga prosedur yang relevan yang mana akan diilustrasikan oleh contoh.

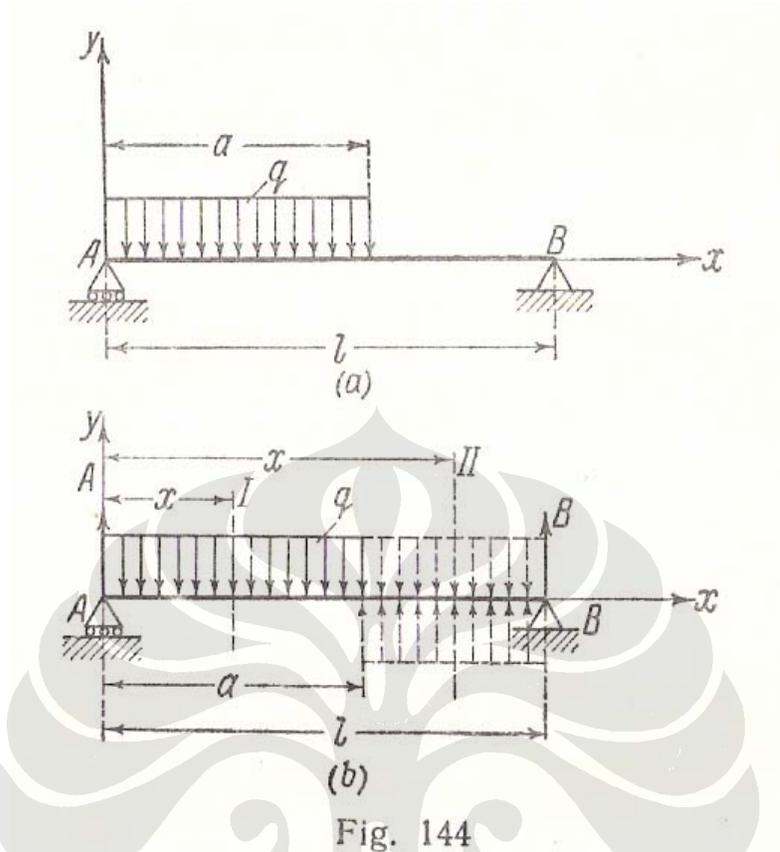


Fig. 144

Gambar 2.12. Beban-Beban Distribusi pada Balok  
 Sumber : Kinasoshvili.R, *Strength of Materials*, 1978

Prosedur pertama berisi tentang integral beberapa gambar yang ditengah-tengahnya mengandung tanpa membuka mereka. Untuk contoh, integral pada bentuk  $P(x-a)$  dibentuk tanpa membuka ditengah-tengahnya, sebagai contoh, berdasarkan persamaan berikut :

$$\int P(x-a)^m dx = P \frac{(x-a)^{m+1}}{m+1} + C \quad (2-18)$$

Integral dari rumus ini berbeda dari integral dimana ditengah-tengahnya dibuka terlebih dahulu pada besarnya konstanta yang ada.

Prosedur kedua berisikan sebagai berikut. Jika balok yang dipakai untuk menyebarkan beban yang mana tidak mencapai ujung balok, ini seharusnya diperluas sampai ujung dan pada saat yang bersamaan dari intensitas beban yang sama, besarnya sejajar tetapi sebaliknya pada tanda pada beban yang ditambahkan

seharusnya digunakan untuk meninggalkan kondisi operasi pada balok yang tidak berubah.

Jika, untuk contoh, balok dibuat dengan mendistribusikan beban secara seragam dengan intensitas  $q$  yang mana tidak dapat mencapai ujung, beban ini seharusnya diperluas sampai ujung balok (Gambar 2.12), pada saat bersamaan menggunakan beban yang sama tetapi untuk ditambah satu. Dua beban ditambahkan ditunjukkan pada Gambar 2.12.

Prosedur ketiga akan digambarkan oleh contoh. Balok digunakan pada momen kopel  $m$  (Gambar 2.13) pada jarak dari perletakan kiri. Momen bending pada bagian kedua, jika bagian ini didekatkan dari titik awal, kita setuju,

$$Ax - m \quad (2-19)$$

Tidak ada yang berubah jika kita menulis momen sebagai

$$Ax - m(x - a)^0 \quad (2-20)$$

Sebagai contoh, kita memperkenalkan factor  $(x - a)^0$  sama pada seluruhnya ( $a$  adalah panjang balok dari titik awal sampai bagian dimana momen kopel  $m$  digunakan). Prosedur ketiga berisi penjumlahan momen kopel oleh faktor  $(x - a)^0$  sama pada keseluruhan.

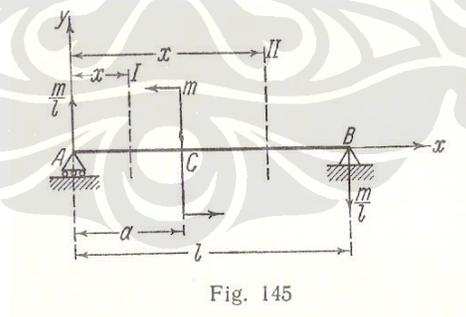


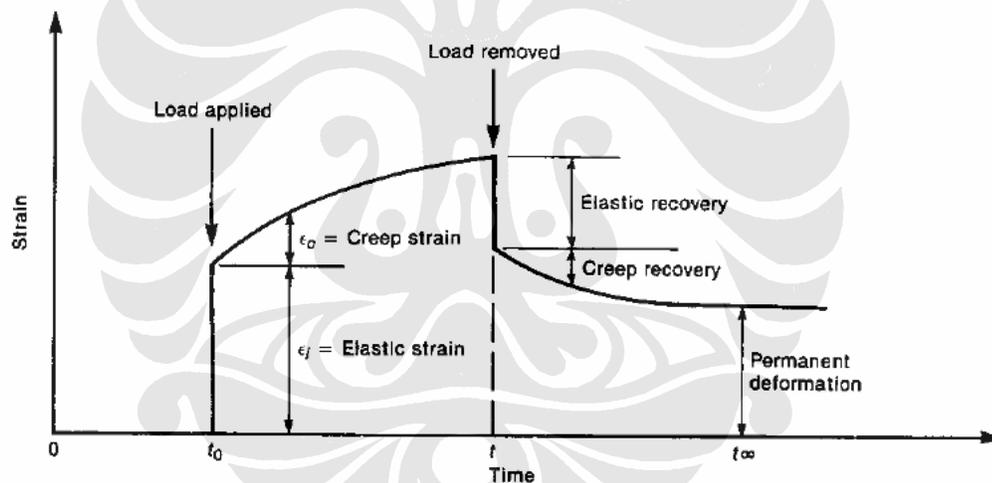
Fig. 145

Gambar 2.13. Momen Kopel pada Balok  
Sumber : Kinasoshvili.R, Strength of Materials, 1978

Dalam menurunkan persamaan umum kurva elastis pada bagian selanjutnya akan menampilkannya, jika prosedur-prosedur yang tadi diikuti, tidak akan pernah ada lebih dari dua konstanta yang ada tak peduli jumlah dari bagian pada balok.

### 2.5.3 Rangkak

Menurut Mc Gregor dalam bukunya berjudul “*Reinforced Concrete Mechanics and Design*”, ketika beton dibebani, regangan elastis bertambah seperti pada Gambar 2.14. Jika beban ini dibiarkan pada beton, regangan rangkak bertambah terhadap waktu. Ini terjadi karena bagian yang menyerap air cenderung menjadi tipis diantara partikel-partikel gel yang menyalurkan tegangan tekan. Perubahan ketebalan ini terjadi secara cepat pertama kali, lalu menurun terhadap waktu. Seiring waktu, bentuk ikatan-ikatan antara partikel-partikel gel menjadi baru. Jika beban diangkat, ada bagian dari regangan yang kembali secara elastis dan bagian yang lain tidak, menyebabkan adanya regangan, seperti pada Gambar 2.14, oleh karena ikatan pada partikel-partikel gel dalam posisi deformasi.



(b) Elastic and creep strains due to loading at time,  $t_0$ , and unloading at time,  $t$ .

Gambar 2.14. Elastisitas dan Rangkak selama Pembebanan pada Balok  
 Sumber : McGregor, James G., *Reinforced Concrete-Mechanics and Design*, 1997

Regangan rangkak,  $\epsilon_c$ , secara cepat muncul setelah ada regangan elastis. Regangan rangkak menimbulkan bertambahnya lendutan seiring dengan waktu; regangan tersebut juga dapat menimbulkan redistribusi tegangan pada penampang serta menyebabkan penurunan pada gaya prategang, dan lain sebagainya.

Rasio pada regangan rangkak terjadi pada regangan elastis dalam jangka waktu yang lama,  $\frac{\epsilon_c}{\epsilon_i}$ , yang disebut koefisien rangkak,  $\phi$ . Rentang dari koefisien rangkak dipengaruhi oleh rasio pada tegangan penahan dari kekuatan beton, kelembaban lingkungan, dimensi dari elemen, dan komposisi beton. Rangkak besar pada beton terjadi pada kandungan campuran semen yang tinggi. Beton mengandung agregat yang besar menyebabkan fraksi rangkak berkurang sehingga rangkak pada pasta terminimalisir, dan rangkak itu ditahan oleh agregat. Perkembangan rata-rata regangan rangkak juga dipengaruhi oleh suhu, mencapai suhu sekitar  $160^{\circ}F$ . Pada suhu tinggi, regangan rangkak yang sangat besar terjadi. Tipe semen (contoh, semen mutu sedang dan tinggi) dan rasio air semen sangat penting pengaruhnya hanya pada kuat tekan pada saat ketika beton dibebani.

Untuk rangkak, seperti pada susut, beberapa perhitungan hampir sama. <sup>(3-6)(3-15)</sup> Metode yang diberikan berasal dari *Model Kode CEB-FIB 1990*.<sup>(3-6)</sup> Ini dapat digunakan untuk beton yang mempunyai kekuatan tegangan sekitar 10000 *psi* pada saat tekanan menaik sampai  $0,4f'_c$  pada saat  $t_o$ , dimana kelembaban relative 40% atau lebih dan suhu rata-rata sekitar  $40^{\circ}$  sampai  $90^{\circ}F$ . Untuk tegangan kurang dari  $0,4f'_c$ , rangkak diasumsikan secara linier terhadap tegangan. Disamping tegangan ini, regangan rangkak meningkat lebih cepat dan akan runtuh pada bagian dimana tegangan lebih dari  $0,75f'_c$ . Dengan cara yang sama, penambahan rangkak terjadi secara drastis pada suhu rata-rata di atas  $90^{\circ}F$ .

Regangan total,  $\epsilon_c(t)$ , terjadi pada saat  $t$  pada bagian beton dibebani tidak secara lateral oleh tegangan konstan,  $\sigma_c(t_0)$  pada saat  $t_o$  adalah :

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cs}(t) + \epsilon_{cT}(t) \quad (2-21)$$

Dimana:

$$\epsilon_{ci}(t_0) = \text{regangan awal saat pembebanan} = \sigma_c(t_0) / E_c(t_0)$$

$$\epsilon_{cc}(t) = \text{regangan rangkak pada saat } t \text{ dimana } t \text{ lebih dari } t_o$$

$$\epsilon_{cs}(t) = \text{regangan susut pada saat } t$$

$$\epsilon_{cT}(t) = \text{regangan suhu pada saat } t$$

$$E_c(t_0) = \text{modulus elastisitas pada saat pembebanan}$$

Hubungan tegangan-regangan pada saat  $t$  adalah :

$$\epsilon_{cs}(t) = \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{cc}(t) \quad (2-22)$$

Untuk tegangan  $\sigma_c$  terjadi pada saat  $t_0$  dimana tetap dibebani sampai  $t$ , regangan rangkaiak  $t_{cc}$ , terjadi antara  $t_0$  dan  $t$  adalah :

$$\epsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(28)} \phi(t, t_0) \quad (2-23)$$

dimana  $E_c(28)$  adalah modulus elastisitas pada umur 28 hari dan  $\phi(t, t_0)$  adalah koefisien rangkaiak, yang diberikan oleh :

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (2-24)$$

dimana  $\phi_0$  adalah rangkaiak awal yang diberikan oleh Pers. (2-25) dan  $\beta_c(t, t_0)$  adalah koefisien untuk menghitung pertambahan rangkaiak pada saatnya, yang diberikan oleh Pers. (2-29).

$$\phi_0 = \phi_{RM} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (2-25)$$

dimana

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / RH_0}{0,46 \left( \frac{h_c}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (2-26)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\left( \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0,5}} \quad (2-27)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + \left( \frac{t_0}{t_1} \right)^{0,2}} \quad (2-28)$$

dimana  $h_c$ ,  $h_0$ ,  $RH$ ,  $RH_0$ ,  $f_{cm}$ ,  $f_{cmo}$  dan  $t_i$  sudah dijelaskan hubungannya dengan Pers. (2-25) sampai (2-38).

Koefisien rangkaiak awal,  $\phi_0$ , biasanya fungsi dari kelembaban relative, komposisi pada beton, dan tingkat hidrasi yang dimulai pada saat pembebanan. Akhirnya dua komponen ini dirumuskan secara empiris dalam Pers. (2-27) dan (2-28) sebagai fungsi kekuatan rata-rata 28 hari,  $f_{cm}$ , dan pada saat pembebanan,  $t_0$ .

Pertambahan rangkaiak terhadap waktu diberikan sebagai berikut:

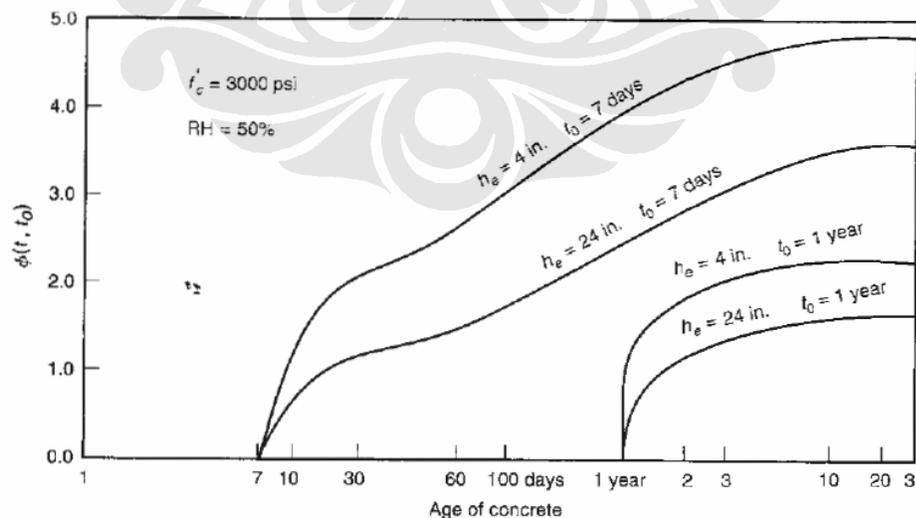
$$\beta_c(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (2-29)$$

dengan

$$\beta_H = 150 \left[ 1 + \left( 1,2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h_c}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (2-30)$$

Pengaruh dari ketebalan efektif dan umur pada saat waktu pembebanan pada koefisien rangkai  $\phi(t, t_0)$  digambarkan dalam Gambar 2-15. koefisien rangkai besarnya sekitar setengah dari beton yang dibebani pada 1 tahun seperti beton dibebani sekitar 7 hari. Pengaruh ketebalan efektif memiliki pengaruh yang kurang ketika pada susut (Gambar 2-15), pengurangan nilai dari  $\phi(t, t_0)$  sekitar 20% seperti yang dicontohkan.

Ketika tes data rangkai dibandingkan, koefisien rangkai  $\phi(t, t_0)$  dihitung menggunakan variasi koefisien sekitar 20%.<sup>(3-6)</sup> Sepuluh persen waktu yang ada nilai dari  $\phi(t, t_0)$  akan berkurang 75% pada perhitungan dan 10% waktu akan bertambah 125% pada perhitungan. Jika lendutan rangkai merupakan masalah yang serius bagi bagian struktur, ini harus diperhatikan dengan melakukan tes rangkai pada beton.



Gambar 2.15. Pengaruh dari Ketebalan Efektif  
Sumber : McGregor, James G., *Reinforced Concrete-Mechanics and Design*, 1997

Tabel 2.4. Koefisien Rangkak

TABLE 3-1 Creep Coefficient,  $\phi(70y, t_0)$  for Normal-Weight Concrete after 70 Years of Loading

Age at Loading, $t_0$ (days)	Dry Atmospheric Conditions (RH = 50%)		Humid Atmospheric Conditions (RH = 80%)	
	Effective Thickness, $h_e$ (Eq. 3-26)			
	6 in.	24 in.	6 in.	24 in.
1	4.8	3.9	3.4	3.0
7	3.3	2.7	2.4	2.1
28	2.6	2.1	1.8	1.6
90	2.1	1.7	1.5	1.3
365	1.6	1.3	1.1	1.0

Source: Ref. 3-6.

Sumber : McGregor, James G., *Reinforced Concrete-Mechanics and Design*, 1997

Pada kasus dimana level rendah dari akurasi dapat diterima, koefisien rangkak pada 70 tahun,  $\phi(70y, t_0)$  dapat diambil dari table 2.4.

Jumlah perpindahan dari bagian beton rata pada saat  $t$  oleh karena elastis dan jumlah regangan rangkak dari tegangan konstan  $\sigma_c$  digunakan pada saat  $t_0$  dapat dihitung menggunakan Pers. 2-22, yang mana menjadi :

$$\epsilon_{c\sigma}(t) = \sigma_c(t_0) \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_c(28)} \right] \quad (2-31)$$

Waktu dalam kurung adalah fungsi pelaksanaan rangkak,  $J(t, t_0)$  merepresentasikan jumlah tegangan tergantung regangan per satuan tegangan.

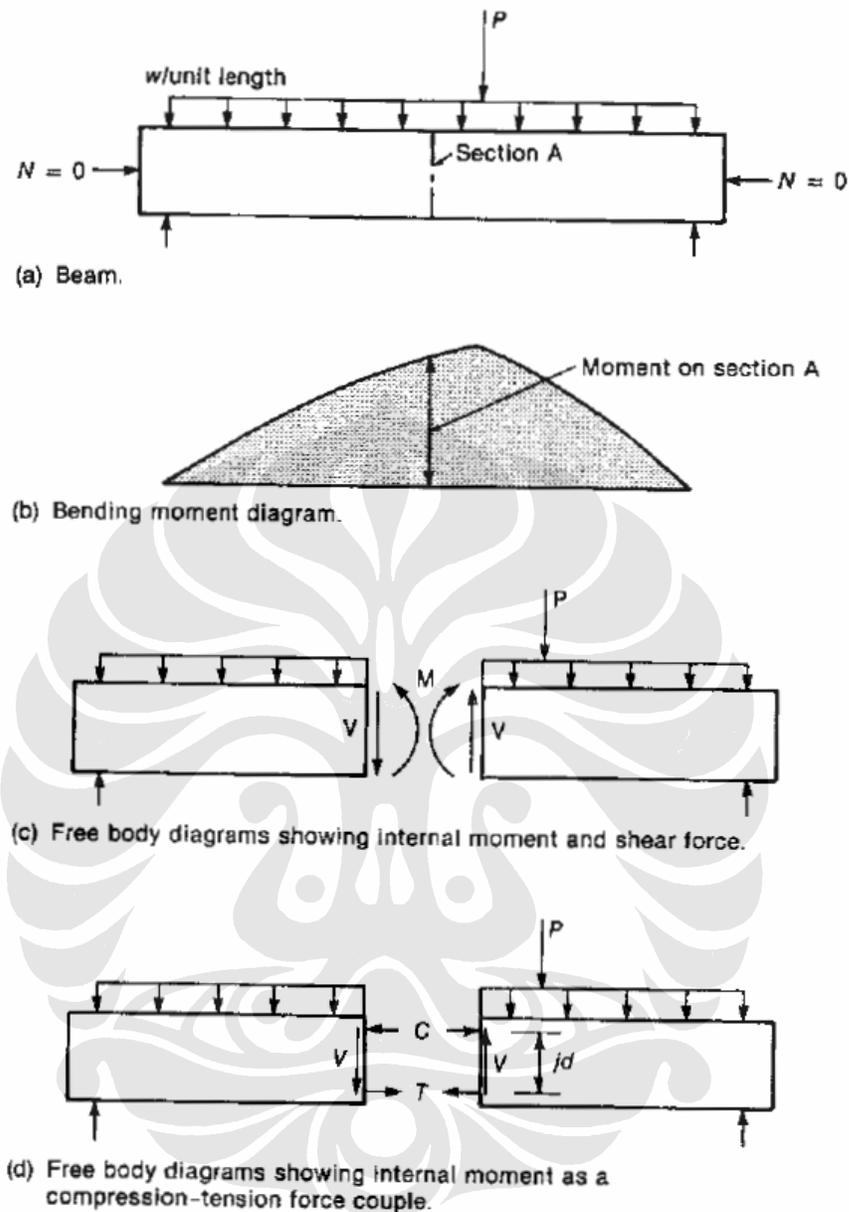
#### 2.5.4 Teori Lentur (Aksi Balok Statik)

Menurut James Mac Gregor, balok adalah bagian structural yang menyangga beban yang diberikan dan berat sendiri mula-mula gaya dalam momen dan lintang. Gambar 2.16a memperlihatkan balok sederhana yang menyangga berat sendiri,  $w$  per satuan jarak, ditambah beban yang diberikan,  $P$ . Jika gaya normal diberikan,  $N$ , sama dengan nol seperti pada gambar, bagian menunjukkan sebagai balok. Jika  $N$  adalah gaya tekan, bagian ini disebut balok-kolom. Jika tarik, bagian akan menjadi tarikan.

Beban,  $w$  dan  $P$ , menyebabkan momen bending yang disebarkan seperti pada Gambar 2.16b. Momen bending adalah pengaruh beban yang terjadi akibat menggunakan hukum static. Untuk balok penyangga sederhana yang diberikan bentang dan diberikan beban,  $w$  dan  $P$ , momen tidak bergantung dari komposisi dan ukuran balok.

Pada bagian balok ini, gaya dalam momen,  $M$ , digambarkan seperti Gambar 2.16c yang penting untuk menyetarakan momen bending. Gaya dalam lintang,  $V$ , juga digambarkan sebagai berikut :





Gambar 2.16. Gaya Dalam pada Balok

Sumber : McGregor, James G., *Reinforced Concrete-Mechanics and Design*, 1997

Gaya dalam momen,  $M$ , jumlah dari gaya dalam tekan,  $C$ , dan gaya dalam tarik,  $T$ , yang terpisah oleh lengan,  $jd$ , seperti Gambar 2.16d. Karena tidak terdapat gaya luar normal,  $N$ , penjumlahan dari gaya-gaya horizontal adalah:

$$C - T = 0 \text{ atau } C = T \quad (2-32)$$

Jika momen adalah penjumlahan gaya-gaya lateral pada satu titik yang diaplikasikan oleh gaya tekan,  $C$ , persamaan momen pada bentuk bebas adalah :

$$M = Tjd \quad (2-33)$$

Sama dengan, jika momen adalah penjumlahan pada satu titik yang diaplikasikan pada gaya tarik,  $T$  :

$$M = Cjd \quad (2-34)$$

Sejak  $C=T$ , dua persamaan ini sama. Persamaan 2-32, 2-33 dan 2-34 datang secara langsung dari static dan dapat diaplikasikan sejajar pada balok buatan baja, kayu dan beton bertulang.

Teori konvensional elastis balok dihasilkan dari persamaan  $\sigma = \frac{M_y}{I}$ , yang mana tidak berlaku bila retak, balok segi empat homogen tanpa tulangan memberikan penyebaran pada tegangan seperti Gambar 2.17. Diagram tegangan ditampilkan pada Gambar 2.17c dan d digambarkan memiliki “volume”, dan secara frekuensi menunjukkan pada blok tegangan tekan dan blok tegangan tarik.

Persamaan tegangan tekan sebagai gaya  $C$  diberikan sebagai berikut :

$$C = \frac{\sigma_c(\max)}{2} \left( b \frac{h}{2} \right) \quad (2-35)$$

Ini sejajar pada volume dari blok tegangan tekan seperti Gambar 2.17d. Dalam arti yang sama satu dapat dihitung sebagai gaya  $T$  dari blok tegangan tarik. Gaya,  $C$  dan  $T$ , sebagai titik berat pada volume pada balok blok tegangan yang digunakan. Pada kasus elastisitas, gaya-gaya ini berada di  $\frac{h}{3}$  bagian atas atau bawah dari garis netral, jadi  $jd = \frac{2h}{3}$ . Dari Persamaan 2-34 dan 2-35 dan Gambar 2.17, kita dapat menulis :

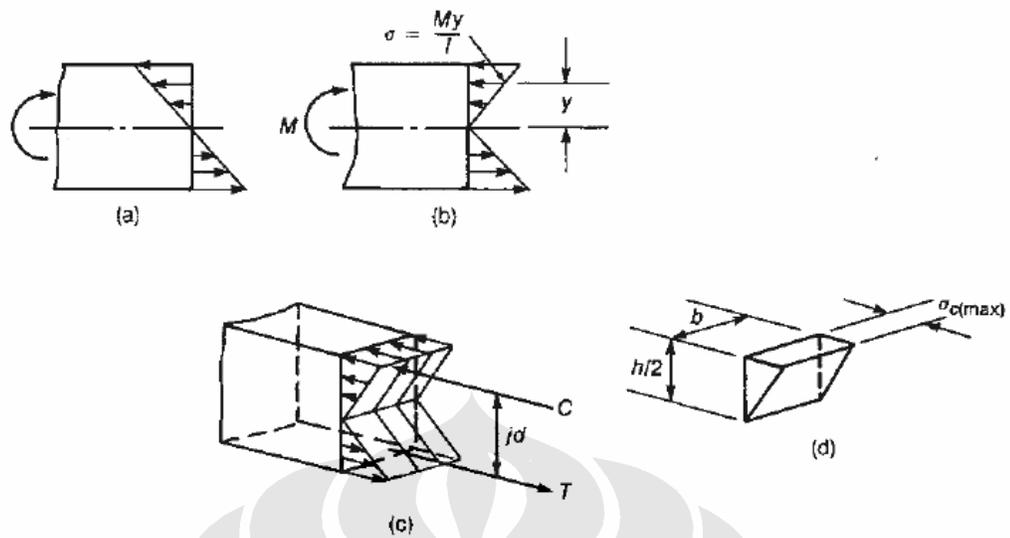
$$M = Cjd \quad (2-36)$$

$$M = \sigma_{C(\max)} \frac{bh}{4} \left( \frac{2h}{3} \right) \quad (2-37)$$

$$M = \sigma_{C(\max)} \frac{bh^3/12}{h/2} \quad (2-38)$$

atau

$$M = \frac{\sigma I}{y} \quad (2-39)$$



Gambar 2.17. Elastis Tegangan Balok dan Tegangan Blok  
 Sumber : McGregor, James G., Reinforced Concrete-Mechanics and Design, 1997

Lalu untuk kasus elastisitas, jawaban yang sama akan diberikan dari tegangan balok tradisional Pers. 2-39, dan dari Pers. 2-33 serta 2-34 menggunakan konsep balok tegangan.