

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1. Beton**

Menurut Tjokrodimuljo (1996), beton merupakan hasil pencampuran *portland cement*, air dan agregat. Terkadang ditambah menggunakan bahan tambah dengan perbandingan tertentu, mulai dari bahan kimia tambahan, *fiber*, sampai bahan buangan non kimia. Sifat-sifat beton pada umumnya dipengaruhi oleh kualitas bahan, cara pengerjaan dan cara perawatannya. Menurut Wang dkk (1986), beton bertulang adalah gabungan logis dari beton polos yang mempunyai kuat tekan tinggi akan tetapi kuat tarik rendah, dan batangan-batangan baja yang ditanamkan di dalam beton dapat memberikan kuat tarik yang diperlukan.

#### **3.2. Bahan Penyusun Beton**

Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi oleh sejumlah bahan penyusunnya (Nawy, 1990). Adapun bahan penyusun beton sebagai berikut :

##### *3.2.1. Portland cement*

*Portland cement* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan *klinker* dengan *gips* sebagai bahan tambahan (Tjokrodimuljo, 1996). Fungsi semen adalah untuk merekatkan butir-butir agregat agar terjadi suatu massa yang padat dan mengisi rongga-rongga antar butir agregat. Adapun *portland cement* dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan penggunaannya, antara lain :

1. Jenis I, yaitu *portland cement* untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada semen jenis lain.
2. Jenis II yaitu *portland cement* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
3. Jenis III, yaitu *portland cement* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV, yaitu *portland cement* yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi yang rendah.
5. Jenis V, yaitu *portland cement* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi terhadap sulfat.

### 3.2.2. Air

Menurut Tjokrodimuljo (1996), air merupakan salah satu bahan yang paling penting dalam pembuatan dan perawatan beton. Fungsi air pada pembuatan beton adalah membantu reaksi kima *portland cement* dan sebagai bahan pelicin antara semen dengan agregat agar mudah dikerjakan. Air yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen hanya sekitar 25-30% dari berat semen. Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut :

- a. Kandungan lumpur (benda melayang lainnya) maksimum 2 gram/liter.
- b. Kandungan klorida maksimum 0,5 gram/liter.
- c. Kandungan garam-garam yang merusak beton (asam, zat organik, dll) maksimum 15 gram/liter.

d. Kandungan senyawa sulfat maksimum 1 gram/liter.

Kekuatan beton dan daya tahannya akan berkurang jika air mengandung kotoran. Adanya lumpur dalam air diatas 2 gram/liter dapat mengurangi kekuatan beton. Air dapat memperlambat ikatan awal beton sehingga beton belum mempunyai kekuatan dalam umur 2-3 hari. Sedangkan *sodium karbonat* dan *potasium* dapat menyebabkan ikatan awal sangat cepat dan konsentrasi yang besar akan mengurangi kekuatan beton (Tjokrodimuljo, 1996).

### 3.2.3. Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 60-70% dari volume adukan beton (Tjokrodimuljo, 2009). Berdasarkan ukuran besar butirnya, agregat yang dipakai dalam adukan beton dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sebagai berikut :

#### 3.2.3.1. Agregat halus

Menurut Tjokrodimuljo (2009), agregat halus (pasir) adalah batuan yang mempunyai ukuran butir antara 0,15-5 mm. Agregat halus dapat diperoleh dari dalam tanah, dasar sungai atau dari tepi laut.

Menurut PBI (1971), syarat-syarat agregat halus (pasir) adalah sebagai berikut:

- a. Agregat halus terdiri dari butiran-butiran tajam dan keras, serta tidak mudah pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti panas matahari dan hujan.

- b. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% terhadap jumlah berat agregat kering. Apabila kandungan lumpur lebih dari 5%, agregat halus harus dicuci terlebih dahulu.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak. Hal demikian dapat dibuktikan dengan percobaan warna dari *Abrams header* dengan menggunakan larutan NaOH.
- d. Agregat halus terdiri dari butiran-butiran yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan harus memenuhi syarat sebagai berikut :
1. Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat.
  2. Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat.
  3. Sisa di atas ayakan 0,25 mm, harus berkisar antara 80-90% berat.

Pasir sebagai agregat halus harus memenuhi gradasi dan persyaratan yang ditentukan. Batasan gradasi agregat halus dapat ditunjukkan seperti pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Batas-batas gradasi agregat halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat butir yang lewat ayakan dalam persen			
	Kasar	Agak Kasar	Agak Halus	Halus
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

(Sumber : Tjokrodimuljo, 2009)

### 3.2.3.2. Agregat kasar

Menurut Tjokrodimuljo (1996), agregat kasar adalah agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar (antara 5 mm sampai 40 mm). Sifat dari agregat kasar akan mempengaruhi kekuatan akhir dari beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar dapat dibedakan menjadi 3 berdasarkan berat jenisnya, yaitu sebagai berikut:

a. Agregat normal.

Agregat normal adalah agregat yang berat jenisnya antar 2,5-2,7 gram/cm<sup>3</sup>. Agregat ini biasanya berasal dari granit, basal, kuarsa dan lain sebagainya. Beton yang dihasilkan mempunyai berat 2,3 gram/cm<sup>3</sup> dan biasa disebut beton normal.

b. Agregat berat.

Agregat berat adalah agregat yang berat jenisnya lebih dari 2,8 gram/cm<sup>3</sup>, misalnya magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), barites (BaSO<sub>4</sub>) atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan mempunyai berat jenis yang tinggi yaitu sampai dengan 5 gram/cm<sup>3</sup> yang digunakan sebagai dinding pelindung atau radiasi sinar X.

c. Agregat ringan.

Agregat ringan adalah agregat yang berat jenisnya kurang dari 2 gram/cm<sup>3</sup> misalnya tanah bakar (*bloated clay*), abu terbang (*fly ash*) dan busa terak tanur tinggi (*foamed blast furnace slag*). Agregat ini biasanya

digunakan untuk beton ringan yang biasanya dipakai untuk elemen non-struktural.

Menurut PBI 1971 syarat-syarat agregat kasar normal adalah sebagai berikut :

- a. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus tidak mudah pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- b. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- c. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat-zat yang reaktif alkali.
- d. Kekerasan butir-butir agregat kasar yang diperiksa dengan bejana penguji dari Rudelof dengan beton penguji 20 ton, yang harus memenuhi syarat-syarat :
  1. Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5-19 mm lebih dari 24% berat.
  2. Tidak terjadi pembubukan sampai 19-30 mm lebih dari 22% berat.

Kekerasan ini dapat juga diperiksa dengan mesin *Los Angeles*. Dalam hal ini tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%.

e. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan harus memenuhi syarat sebagai berikut :

1. Sisa diatas ayakan 31,5 mm harus 0% berat.
2. Sisa diatas ayakan 4 mm harus berkisar antara 90- 98% berat.
3. Selisih antara sisa-sisa kumulatif diatas dua ayakan yang berurutan, maksimum 60% dan minimum 10% berat.

Agregat kasar harus memenuhi gradasi dan persyaratan yang ditentukan.

Batasan gradasi agregat kasar dapat ditunjukkan seperti pada tabel 3.2.

Tabel 3.2. Batas-batas gradasi agregat kasar

Ukuran saringan (mm)	Prosentase lolos saringan	
	Kasar	Agak Halus
40	95-100	100
20	30-70	95-100
10	10-35	22-55
4,8	0-5	0-10

(Sumber : Tjokrodimuljo, 2007)

#### 3.2.4. Bahan Tambah

Menurut Tjokrodimuljo (2009) bahan tambah adalah suatu bahan berupa bubuk atau cairan yang ditambahkan kedalam adukan beton, bertujuan untuk mengubah sifat adukan atau betonnya. Menurut Mulyono (2004) bahan tambah dalam beton dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

#### 3.2.4.1. Bahan tambah mineral (*additive*)

Pemberian bahan tambah ini bertujuan untuk memperbaiki kinerja beton. Contoh bahan tambah mineral adalah abu terbang batu bara (*fly ash*), *slag* dan *silica fume*.

#### 3.2.4.2. Bahan tambah kimia (*chemical admixture*)

Bahan tambah kimia bertujuan mengubah beberapa sifat beton. Adapun macam-macam bahan tambah kimia, yaitu :

##### a. Tipe A (*water reducing admixtures*)

*Water reducing admixtures* adalah bahan tambah yang mengurangi air pencampur yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu.

##### b. Tipe B (*retarding admixture*)

*Retarding admixture* adalah bahan tambah yang berfungsi untuk menghambat waktu pengikatan beton. Misalnya karena kondisi cuaca panas dimana tingkat kehilangan sifat pengerjaan beton sangat tinggi.

##### c. Tipe C (*accelerating admixture*)

*Accelerating admixtures* adalah bahan tambah yang berfungsi untuk mempercepat pengikatan dan pengembangan kekuatan awal beton.

##### d. Tipe D (*water reducing and retarding admixture*)

*Water reducing and retarding admixture* adalah bahan tambah yang berfungsi ganda, yaitu mengurangi jumlah air yang diperlukan campuran beton dengan konsistensi tertentu dan menghambat pengikatan awal.

e. Tipe E (*water reducing and acceleratiing admixtures*)

*Water reducing and acceleratiing admixtures* adalah bahan tambah yang berfungsi ganda, yaitu mengurangi jumlah air untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan mempercepat pengikatan awal.

f. Tipe F (*water reducing high range admixtures*)

*Water reducing high range admixtures* adalah bahan tambah berfungsi untuk mengurangi jumlah air pencampur yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu, sebanyak 12% atau lebih. Pengurangan kadar air dalam bahan ini lebih tinggi, bertujuan agar kekuatan beton yang dihasilkan lebih tinggi dengan air yang sedikit tetapi tingkat kemudahan pengerjaannya lebih tinggi. Jenis bahan tambah ini adalah *superplasticizer*, dosis yang disarankan adalah sekitar 1-2% dari berat semen. Dosis yang berlebihan akan menyebabkan menurunnya kuat tekan beton.

g. Tipe G (*water reducing high range retarding admixtures*)

*Water reducing high range retarding admixtures* adalah bahan tambah berfungsi untuk mengurangi jumlah air pencampur yang digunakan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu, sebanyak 12% atau lebih dan juga untuk menghambat pengikatan beton. Jenis bahan tambah ini merupakan gabungan *superplasticizer* dengan penunda waktu pengikatan.

### **3.3. Beton Fiber**

Menurut Soroushian, P. dan Bayazi, Z. (1987), beton *fiber* adalah beton yang dibuat dari campuran semen, agregat, air dan sejumlah *fiber* yang disebar secara *random*. Beton *fiber* mempunyai kelebihan dibanding beton tanpa *fiber* dalam beberapa sifat strukturnya, antara lain keliatan (*ductility*), ketahanan terhadap beban kejut (*impact resistance*), kuat tarik dan kuat lentur (*tensile and flexural strength*), kekuatan terhadap pengaruh susut (*shrinkage*) dan ketahanan terhadap keausan (*abrasion*). Ada beberapa *fiber* yang sering dipakai dalam campuran beton antara lain :

#### **3.3.1 Fiber Baja**

Kelebihan *fiber* ini adalah kekuatan dan modulusnya yang tinggi, tetapi *fiber* ini juga mempunyai kelemahan yaitu sangat korosif. Hal ini akan terlihat bila ada sebagian dari *fiber* yang tidak terlindung/tertutup beton. Ada beberapa tipe *fiber* baja yang biasa digunakan :

1. Bentuk *fiber* baja (*steel fiber shapes*)
  - a. Lurus (*straight*)
  - b. Berkait (*hooked*)
  - c. Bergelombang (*crimped*)
  - d. *Double duo form*
  - e. *Ordinary duo form*
  - f. Bundel (*paddled*)
  - g. Kedua ujung ditekuk (*enlarged ends*)
  - h. Tidak teratur (*irregular*)

i. Bergerigi (*indented*)

2. Penampang *fiber* baja (*steel fiber cross section*)

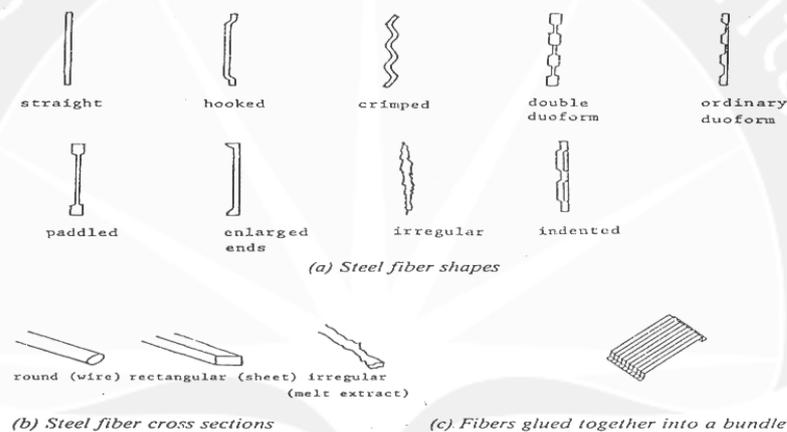
a. Lingkaran atau kawat (*round* atau *wire*)

b. Persegi atau lembaran (*rectangular* atau *sheet*)

c. Tidak teratur atau bentuk dilelehkan (*irregular* atau *melt extract*)

3. *Fiber* dilekatkan bersama dalam satu ikatan (*fiber glued together into a bundle*).

Tipe dari *fiber* baja dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Berbagai tipe bentuk *fiber* baja

### 3.3.2 *Fiber* Gelas

Kekuatan *fiber* gelas sebanding dengan *fiber* baja, yaitu mempunyai kepadatan lebih rendah dan modulus elastisitasnya sekitar sepertiga dari baja. Namun kelemahan utama dari *fiber* gelas yaitu *fiber* gelas dapat rusak dalam waktu jangka panjang karena memiliki kerentanan tinggi dalam lingkungan alkali semen. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini, yaitu mengembangkan *fiber* gelas tahan alkali atau semen rendah alkali. Namun masalah lain adalah harga *fiber* gelas yang relatif tinggi.

### 3.3.3. *Fiber* Plastik (*Polypropelene*)

*Polypropelene* adalah salah satu jenis *fiber* plastik. Sifat *fiber* ini adalah tidak menyerap air semen, modulus elastisitas rendah, mudah terbakar, kurang tahan lama dan titik lelehnya yang rendah.

### 3.3.4. *Fiber* Karbon

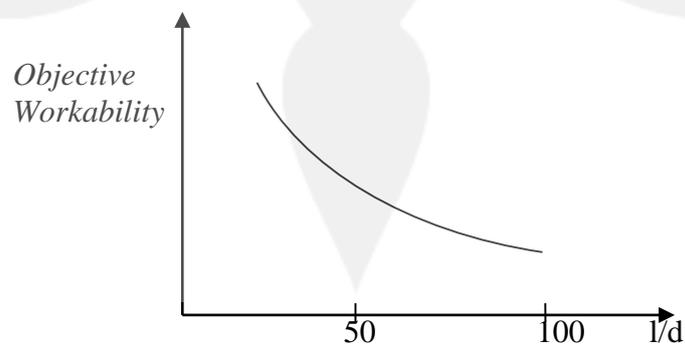
*Fiber* ini juga relatif mahal. *Fiber* ini sering dipakai untuk beton yang harus mempunyai ketahanan terhadap retak yang tinggi.

## 3.4. Variabel Beton *Fiber*

Menurut Sorousihan, P. dan Bayasi, Z. (1987) dalam pembuatan beton *fiber* ada beberapa variabel yang perlu diperhatikan, antara lain :

### 3.4.1 Aspek Rasio

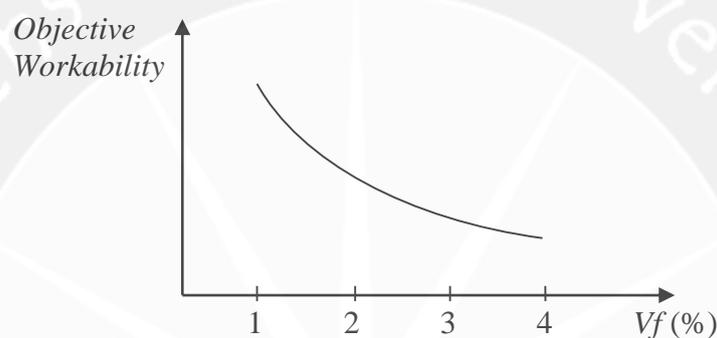
Aspek rasio adalah tingkat kelangsingan *fiber*. Secara empirisnya merupakan nilai perbandingan antara panjang *fiber* dengan diameter *fiber*. Semakin besar nilai aspek rasio akan semakin mengurangi kelecakan beton. Pengaruh aspek rasio terhadap *workability* dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Pengaruh aspek rasio terhadap *workability*

### 3.4.2 Volume Fraksi ( $V_f$ )

Volume fraksi adalah prosentase volume *fiber* yang ditambahkan pada setiap satuan volume beton. Semakin tinggi volume fraksi yang ditambahkan ke dalam campuran beton, maka kelecakan adukan beton akan semakin rendah. Grafik mengenai pengaruh penggunaan volume fraksi campuran beton *fiber* dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Pengaruh volume fraksi terhadap *workability*

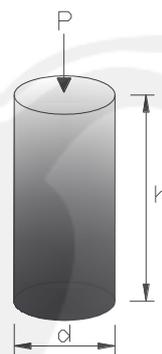
### 3.5. Slump Test dan VB Time Test

Menurut Tjokrodimuljo (1996), pengujian *slump* adalah suatu cara untuk mengukur kelecakan adukan beton. Pada kasus beton *fiber* pengujian kelecakan tidak hanya berdasar pada nilai *slump*, namun juga diikuti dengan pengujian nilai *VB time* nya. *VB apparatus* adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengukur kelecakan adukan beton normal/beton *fiber*. Alat ini terdiri dari kerucut *Abrams* (biasa digunakan dalam *slump test*) diletakkan di dalam sebuah wadah yang berada di atas meja getar. Adukan beton dimasukkan dalam kerucut *Abrams*, kemudian diangkat ke atas dan dihitung nilai *slump* nya. Nilai *slump* adukan beton normal biasanya diambil nilainya sekitar 75-150 mm yaitu untuk pembuatan plat, balok dan kolom (PBI, 1971). Selanjutnya alat *VB apparatus* dihidupkan sampai permukaan

adukan beton berubah menjadi rata. Waktu penggetaran yang diperlukan untuk meratakan ini disebut *VB time*. Bila adukan memiliki *VB time* antara 5 sampai 25 detik, maka adukan tersebut dapat diterima dikarenakan mempunyai tingkat kelecakan yang baik (ACI Committee 544, 1984).

### 3.6. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu oleh mesin tekan (SNI 03-1974-1990). Untuk benda uji dengan dimensi yang berbeda nilai kuat tekan beton didapat dengan mengkonversi hasil beton menggunakan faktor kali yang telah tersedia pada SNI 1974-2011. Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tertinggi ( $f'c$ ) yang dicapai benda uji umur 28 hari akibat beban tekan selama percobaan. Sketsa pengujian kuat tekan beton dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Sketsa pengujian kuat tekan beton

Rumus untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton berdasarkan percobaan di laboratorium adalah sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A_0} \quad (3-1)$$

Keterangan :

$f'_c$  : kuat tekan beton (MPa)

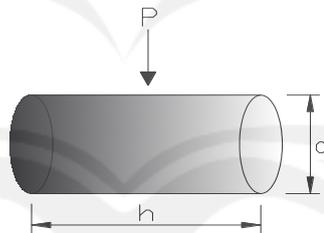
$P$  : beban tekan (N)

$A_o$  : luas penampang benda uji ( $\text{mm}^2$ )

Sifat beton yang baik adalah jika beton tersebut memiliki kuat tekan tinggi (antara 20-50 MPa pada umur 28 hari). Dengan kata lain dapat diasumsikan bahwa mutu beton ditinjau hanya dari kuat tekannya saja (Tjokrodimuljo, 1996).

### 3.7. Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik belah beton adalah nilai kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji tersebut. Benda uji diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja mesin uji tekan (SNI 03-2491-2002). Sketsa pengujian kuat tarik belah beton dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.5. Sketsa pengujian kuat tarik belah beton

Rumus untuk mendapatkan nilai kuat tarik belah beton berdasarkan percobaan di laboratorium adalah sebagai berikut :

$$f_t = \frac{2P}{dh} \quad (3-2)$$

Keterangan :

$f_t$  : kuat tarik belah beton (MPa)

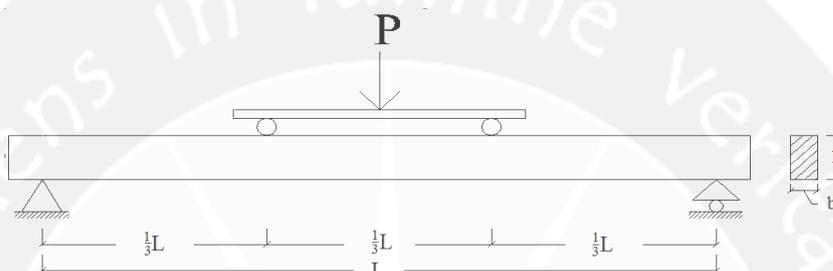
$P$  : beban maksimum (N)

$h$  : tinggi silinder (mm)

$d$  : diameter silinder beton (mm)

### 3.8. Kuat Lentur Balok Beton

Kuat lentur balok beton adalah kemampuan balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, sampai benda uji patah (SNI 03-4431-1997). Sketsa pengujian kuat lentur balok dapat ditunjukkan seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Sketsa pengujian kuat lentur balok

Rumus-rumus perhitungan yang digunakan dalam metode pengujian kuat lentur balok beton adalah sebagai berikut :

1. Pengujian dimana patahnya benda uji ada di daerah pusat ( $\frac{1}{3}$  jarak titik perletakan) di bagian tarik dari beton, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan :

$$f_{lt} = \frac{PL}{bh^2} \quad (3-3)$$

2. Pengujian dimana patahnya benda uji ada di luar pusat (diluar daerah  $\frac{1}{3}$  jarak titik perletakan) di bagian tarik beton, dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari panjang titik perletakan, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan :

$$f_{lt} = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (3-4)$$

Keterangan :

$f_{lt}$  : kuat lentur balok beton (MPa)

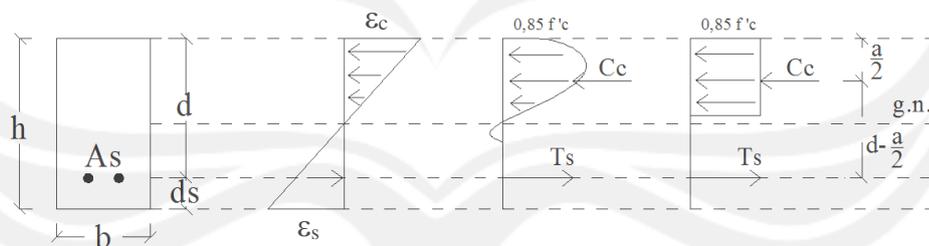
$P$  : beban maksimum yang mengakibatkan keruntuhan balok uji (N)

- $l$  : panjang bentang di antara kedua blok tumpuan (mm)  
 $b$  : lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)  
 $h$  : lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)  
 $a$  : jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sisi titik dari bentang (mm)

3. Untuk benda uji yang patahnya di luar 1/3 lebar pusat pada bagian tarik beton dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak dipergunakan.

### 3.9. Momen Ultimit

Balok direncanakan sedemikian rupa sehingga semua materialnya (beton dan baja tulangan) mencapai kapasitasnya sebelum runtuh. Hal ini menunjukkan bahwa beton dan baja tersebut akan runtuh secara simultan pada saat kekuatan batas balok tercapai. Diagram tegangan dan regangan pada keadaan ini diperlihatkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7. Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok beton normal

Keterangan pada gambar 3.7 :

- $C_c$  : gaya tekan beton (kN)  
 $T_s$  : gaya tarik tulangan (kN)  
 $f'_c$  : kuat tekan beton normal (MPa)  
 $b$  : lebar balok tertekan (mm)  
 $d$  : tinggi balok diukur dari tepi sisi yang tertekan ke titik berat luas beton (mm)  
 $ds$  : tinggi balok diukur dari tepi bawah balok ke setengah tulangan utama (mm)

- $h$  : tinggi total balok (mm)  
 $c$  : jarak antara garis netral ke sisi atas balok (mm)  
 $a$  : tinggi tegangan ekuivalen (mm)  
 $A_s$  : luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )  
 $\sigma_c$  : regangan pada tepi sisi yang tertekan  
 $\sigma_s$  : regangan pada tulangan baja yang tertarik  
 $g.n.$  : garis netral

Supaya keseimbangan gaya horizontal terpenuhi, gaya tekan  $C_c$  pada beton dan gaya tarik  $T_s$  pada tulangan harus saling mengimbangi, dapat dilihat seperti persamaan di bawah ini :

$$C_c = T_s \quad (3-5)$$

$$0,85 \times f'_c \times a \times b = A_s \times f_y \quad (3-6)$$

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \quad (3-7)$$

$$M_n = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3-8)$$

Karena  $C_c = T_s$ , maka persamaan momen dapat ditulis sebagai berikut :

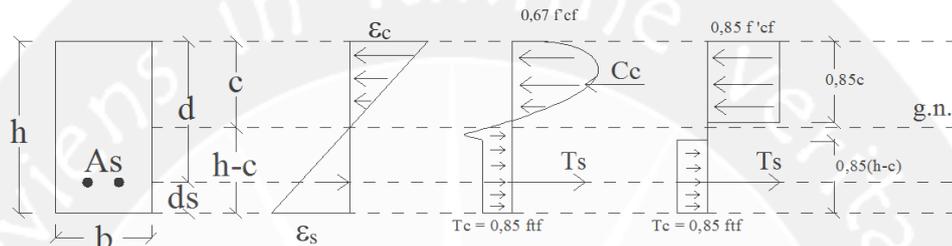
$$M_n = 0,85 \times f'_c \times a \times b \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3-9)$$

$$M_u = 0,8 \times M_n \quad (3-10)$$

Keterangan :

- $C_c$  : gaya tekan beton (kN)  
 $T_s$  : gaya tarik tulangan (kN)  
 $f'_c$  : kuat tekan beton (MPa)  
 $f_y$  : kekuatan leleh tulangan tarik (MPa)  
 $b$  : lebar balok (mm)  
 $d$  : tinggi balok diukur dari tepi sisi yang tertekan ke titik berat luas beton (mm)  
 $a$  : tinggi tegangan ekuivalen (mm)  
 $A_s$  : luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )  
 $M_n$  : momen nominal (kNm)  
 $M_u$  : momen ultimit (kNm)

Balok beton bertulang yang diberi *fiber* parsial, analisis tampang harus dimodifikasi sedikit dari prosedur balok normal (konvensional), yaitu diagram tegangan tarik beton hanya digambarkan sebatas bagian tampang balok yang ada *fibernya*. Distribusi tegangan lentur balok beton *fiber* dapat dilihat seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok beton *fiber*

Simbol-simbol yang ada pada gambar 3.8 :

- $C_c$  : gaya tekan beton (kN)
- $T_s$  : gaya tarik tulangan (kN)
- $T_c$  : gaya tarik beton (kN)
- $f'_{cf}$  : kuat tekan beton *fiber* (MPa)
- $ff$  : kuat tarik beton *fiber* (MPa)
- $b$  : lebar balok tertekan (mm)
- $d$  : tinggi balok diukur dari tepi sisi yang tertekan ke titik berat luas beton (mm)
- $ds$  : tinggi balok diukur dari tepi bawah balok ke setengah tulangan utama (mm)
- $h$  : tinggi total balok (mm)
- $c$  : jarak antara garis netral ke sisi atas balok (mm)
- $a$  : tinggi tegangan ekuivalen (mm)
- $A_s$  : luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )
- $\square_c$  : regangan pada tepi sisi yang tertekan
- $\square_s$  : regangan pada tulangan baja yang tertarik
- $g.n.$  : garis netral

Supaya keseimbangan gaya horizontal terpenuhi, gaya tekan  $C_c$  pada beton dan gaya tarik  $T_s$  pada tulangan serta gaya tarik  $T_c$  pada beton harus saling mengimbangi, dapat dilihat seperti persamaan di bawah ini :

$$C_c = T_s + T_c \quad (3-11)$$

$$C_c = 0,67 \times f'_{cf} \times c \times b \quad (3-12)$$

$$T_c = 0,85 \times f_{tf} \times 0,85 \times h_f \times b \quad (3-13)$$

$$T_s = A_s \times f_y \quad (3-14)$$

Karena  $C_c = T_s + T_c$ , maka persamaan momen dapat ditulis sebagai berikut :

$$M_u = T_c \times \left( h - \frac{3}{8} \times c - \frac{h_f}{2} \right) + T_s \times \left( d - \frac{3}{8} \times c \right) \quad (3-15)$$

Keterangan :

- $C_c$  : gaya tekan beton (kN)
- $T_s$  : gaya tarik tulangan (kN)
- $T_c$  : gaya tarik beton (kN)
- $f'_{cf}$  : kuat tekan beton *fiber* (MPa)
- $f_{tf}$  : kuat tarik beton *fiber* (MPa)
- $f_y$  : kekuatan leleh tulangan tarik (MPa)
- $h$  : tinggi balok (mm)
- $h_f$  : tinggi daerah tarik beton yang diberi *fiber* (mm)
- $b$  : lebar balok (mm)
- $d$  : tinggi balok dari tepi ke baja tulangan (mm)
- $a$  : tinggi tegangan ekuivalen (mm)
- $A_s$  : luas tulangan tarik (mm<sup>2</sup>)
- $M_n$  : momen nominal (kNm)
- $M_u$  : momen ultimit (kNm)

### **3.10. Hubungan Beban dengan Defleksi**

Menurut Nawy (1990), lentur pada balok beton merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila bebannya bertambah, maka pada balok beton terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya atau bertambahnya retak lentur disepanjang bentang balok.

Pada saat pembebanan telah mencapai beban maksimum dan terjadi momen batas yang menimbulkan runtuh, maka penampang balok akan terus berdeformasi tanpa menghasilkan gaya tambahan. Setelah itu keadaan tidak stabil

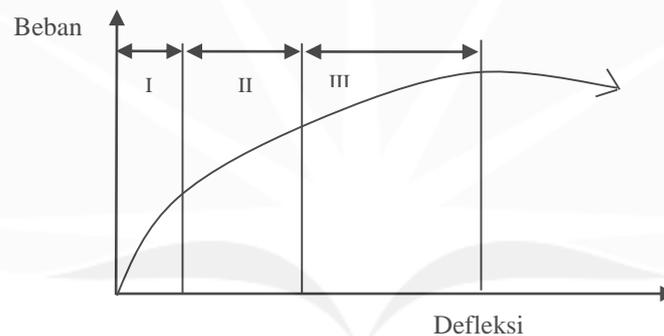
dan lendutan (defleksi) tidak terkendali. Rumus lendutan (defleksi) yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$\Delta = \frac{23 \times P \times L^3}{648 \times E \times I} \quad (3-16)$$

Keterangan :

- $\Delta$  : defleksi balok (mm)
- $P$  : beban balok (N)
- $L$  : panjang bentang balok (mm)
- $E$  : modulus elastis bahan (MPa)
- $I$  : momen inersia penampang (mm<sup>4</sup>)

Hubungan beban-defleksi balok beton bertulang dapat dilihat seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.9. Hubungan beban dengan defleksi balok beton bertulang

Keterangan :

- Daerah I : taraf pra retak, dimana batang-batang strukturalnya bebas retak
- Daerah II : taraf pasca retak, dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkendali yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya.
- Daerah III : taraf pasca *serviceability*, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya.

### **3.11. Hubungan Momen dengan Kelengkungan**

Berdasarkan pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik distrik, seperti  $y_{i-1}$ ,  $y_i$  dan  $y_{i+1}$ , kemiringan garis lengkung didekati dengan metode *central differences* :

$$\Phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (3-17)$$

Keterangan :

- $\Phi$  : kelengkungan
- $y_i$  : titik-titik distrik
- $\Delta x$  : jarak antara titik-titik distrik

Sedangkan rumus untuk menentukan momen lentur adalah sebagai berikut :

$$M = E \times I \times \Phi \quad (3-18)$$

Keterangan :

- $M$  : momen lentur (kNm)
- $E$  : modulus elastis bahan (MPa)
- $I$  : momen inersia penampang (mm<sup>4</sup>)
- $\Phi$  : kelengkungan