

## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Beton



**Gambar 3.1 Beton**

Beton merupakan material yang terbuat dari campuran air, semen, gregat kasar serta agregat halus. Campuran beton harus diaduk serta diukur sedemikian rupa agar menghasilkan beton yang bermutu dengan *workability* yang baik. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi mutu beton, antara lain:

1. Faktor air semen
2. Perbandingan bahan penyusunnya
3. Kualitas bahan penyusunnya
4. Susunan butiran agregat yang digunakan
5. Ukuran maksimum butiran agregat
6. Bentuk butiran agregat

## **3.2 Bahan Penyusun Beton**

### **3.2.1 Semen**

Semen merupakan campuran dari bahan penyusun seperti semen *Portland* dan *pozzolan*. Semen diperoleh dengan cara menghasilkan klinker yang terdiri dari bahan silikat kalsium dan beberapa bahan tambah lainnya yang bereaksi dengan air. Semen dalam pengertian umum mempunyai sifat *adhesive* yang digunakan sebagai bahan pengikat, yang digunakan bersama dengan pasir dan agregat. Adapun beberapa senyawa yang berpengaruh terhadap semen adalah ( $\text{SiO}_2$ ) dan  $\text{Ca(OH)}_2$ .

### **3.2.2 Air**

Air dalam semen berfungsi sebagai bahan pencampur dan pengaduk antara semen dan agregat. Adapun terdapat berbagai persyaratan dimana air dapat digunakan sebagai bahan pencampur bangunan:

1. Air harus bersih
2. Air tidak mengandung lumpur
3. Tidak boleh mengandung benda-benda yang tersuspensi lebih dari 2 gram/liter
4. Tidak boleh terdapat garam-garam yang dapat larut dan merusak beton
5. Air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimiawi dan di evaluasi lebih lanjut.

### **3.2.3 Agregat**

Agregat mempunyai peran penting dalam penyusunan beton. Agregat harus memiliki persyaratan tertentu supaya beton dapat berfungsi

sebagai satu kesatuan yang utuh, homogen, dan rapat. Terdapat 2 jenis agregat, yaitu agregat kasar dan halus. Contoh dari agregat kasar adalah kerikil dan contoh dari agregat halus adalah pasir.

### 3.3 **Fiber Reinforced Polymer (FRP)**

Menurut Masuelli (2013), *FRP (Fiber Reinforced Polymer)*, atau plastik bertulang serat merupakan bahan komposit yang terbuat dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat seperti karbon, aramid, atau kaca (*glass*). Meskipun terkadang menggunakan serat lain misalnya asbes, kayu, atau kertas. Dalam penerapannya, *FRP* dipasang dengan suatu perekat (*Epoxy Impregnation Resin*) yang akan merekatkan fiber pada sisi balok beton.

### 3.4 **Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)**



**Gambar 3.2 Glass Fiber Reinforced Polymer**

Menurut Feldman dan Hartono (1995), *GFRP* adalah material komposit yang berasal dari serat gelas dalam matriks polimer. Serat berfungsi sebagai

perkuatan, sedangkan matriks berfungsi sebagai pemegang atau penahan serat agar tidak bergeser, pelindung filamen dari goresan dan zat kimia panas serta pelintas tegangan terhadap serat.

Perkuatan *GFRP* biasanya digunakan sebagai perkuatan kolom, balok, dan struktur bangunan lainnya. Selain sebagai perkuatan, *GFRP* juga dapat digunakan sebagai pelapis interior ataupun eksterior ruangan karena *GFRP* merupakan bahan yang tahan pada segala cuaca, tahan terhadap air yang mengandung garam dan tahan terhadap korosi. Adapun kelebihan penggunaan *GFRP*, antara lain:

1. Daktilitas yang tinggi
2. Mudah diaplikasikan
3. Biaya pemeliharaan yang relatif terjangkau
4. Dapat mengurangi biaya tenaga kerja
5. Tahan terhadap korosi
6. Memiliki kekakuan yang tinggi

Sedangkan kelemahan penggunaan *GFRP*, yaitu:

1. Biaya material yang relatif mahal

Penggunaan *GFRP* pada perkuatan balok seperti yang dirumuskan pada *ACI Committee 440.2R-17* dapat diletakkan pada sisi luar permukaan balok maupun di bawah permukaan balok. Bentuk dari *GFRP* pun bermacam-macam, ada yang berbentuk *wrap*, *sheet*, *bar* maupun *laminates*. Beberapa jenis serat kaca yang terdapat di pasaran yakni:

1. **E-Glass**, merupakan jenis serat kaca yang paling banyak digunakan serta memiliki kandungan alkali yang rendah dan memiliki sifat mekanis yang tinggi.
2. **Z-Glass**, memiliki ketahanan terhadap alkali. Sering digunakan sebagai bahan mortar dan semen.
3. **A-Glass**, memiliki kandungan alkali yang tinggi.
4. **C-Glass**, digunakan untuk penerapan yang memiliki ketahanan terhadap korosi yang besar, seperti aplikasi kimia.
5. **S** atau **R-Glass**, merupakan jenis yang diproduksi untuk modulus yang tinggi.

### 3.5 **Balok Beton Bertulang**

Beton bertulang adalah gabungan dua jenis material atau bahan yaitu beton dan tulangan baja. Beton polos material yang memiliki kuat tekan tinggi tetapi memiliki kuat tarik yang rendah, sedangkan tulangan baja akan memberikan kuat tarik yang dibutuhkan. Dengan adanya kelebihan dari tiap elemen tersebut, maka konfigurasi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat saling melengkapi dalam menahan gaya-gaya yang terjadi dalam struktur tersebut, di mana beton menahan gaya tekan dan tulangan baja menahan gaya tarik. (Naibaho, 2008)

Ada pula jenis-jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok beton bertulang seperti berikut:

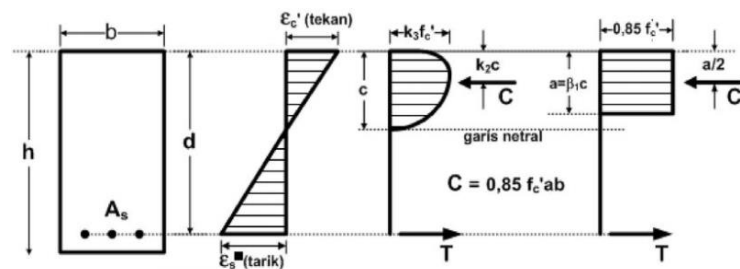
1. Keruntuhan tarik (*under reinforced*), keruntuhan jenis ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan yang kecil (jumlah tulangan sedikit), sehingga pada saat beban kerja mencapai maksimum. Tulangan baja sudah mencapai regangan lelehnya sedangkan balok beton belum runtuh (beton belum mencapai regangan

maksimum = 0,003). Balok beton dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat *ductile*.

2. Keruntuhan tekan (*over reinforced*), keruntuhan jenis ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan besar (jumlah tulangan banyak), sehingga pada saat beban kerja mencapai maksimum, tulangan baja belum mencapai regangan lelehnya sedangkan balok beton telah hancur (beton sudah mencapai regangan maksimum = 0,003). Balok beton dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat getas.
3. Keruntuhan seimbang (*balance*), keruntuhan jenis ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan seimbang sehingga pada saat beban kerja mencapai maksimum, tulangan baja dan balok beton telah mencapai regangan maksimum = 0,003. Balok beton dengan kondisi keruntuhan seperti ini bersifat getas.

### 3.6 Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Distribusi tegangan pada balok beton bertulang yang telah mencapai kekuatan nominal yaitu seperti berikut:



**Gambar 3.3 Distribusi Tegangan pada Balok Beton Bertulang**

Keterangan gambar:

- b : Lebar balok
- h : Tinggi Balok
- $\epsilon_c$  : Regangan ultimit beton sebesar 0.003
- $\epsilon_s$  : Regangan tarik tulangan baja
- d : Tinggi balok efektif

Momen lentur pada balok beton bertulang terjadi akibat oleh beban eksternal yang bekerja pada balok tersebut. Apabila beban itu semakin bertambah nilainya, keruntuhan elemen struktur akan terjadi. Dalam perencanaan kuat lentur balok bertulang, nilai intensitas tegangan rata-rata ( $\beta_1$ ) bernilai:

1. Untuk  $f'c \leq 28 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,85 \dots \dots \dots (3-1)$$

2. Untuk  $28 \text{ MPa} \leq f'c \leq 56 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f'c - 28 \text{ MPa}}{7 \text{ MPa}} \dots \dots \dots (3-2)$$

3. Untuk  $f'c \geq 56 \text{ MPa}$

$$\beta_1 = 0,65 \dots \dots \dots (3-3)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, maka kuat lentur nominal dapat dihitung. Untuk menghitung kuat lentur nominal balok beton bertulang, dilakukan perhitungan tegangan, regangan maupun gaya yang terjadi pada penampang balok dalam menahan momen. Sehingga untuk menghitung kuat lentur balok dapat dilakukan perumusan:

$$C_c = 0,85 f'c . a . b \dots \dots \dots (3-4)$$

$$T_s = A_s f_s \dots \dots \dots (3-5)$$

Dengan:

- $C_c$  : Gaya tekan pada beton (N)
- $T_s$  : Gaya tarik pada baja (N)
- $F'c$  : Kuat tekan beton (MPa)
- $a$  : Tinggi balok tegangan (mm)
- $b$  : Lebar balok (mm)
- $f_y$  : Tegangan leleh baja (MPa)
- $A_s$  : Luas baja tarik ( $\text{mm}^2$ )

Dengan persamaan kesetimbangan gaya dalam, didapat:

$$C_c = T_s \dots \dots \dots (3-6)$$

$$0,85 f' c . a . b = A_s f_s \dots \dots \dots (3-7)$$

Sehingga dari persamaan (3-7) dapat diperoleh:

$$a = \beta_1 c = \frac{A_s f_y}{0,85 f' c' b} \dots \dots \dots (3-8)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} \dots \dots \dots (3-9)$$

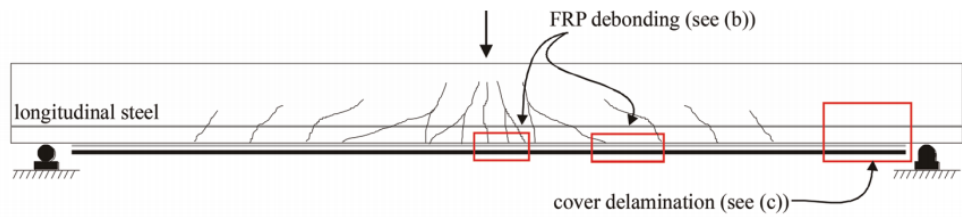
Berdasarkan persamaan (3-5) dan (3-6) serta asumsi bahwa tulangan  $f_s = f_y$ , maka kuat lentur nominal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_n = T_s \left( d - \frac{a}{2} \right) = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots \dots \dots (3-10)$$

Untuk perkuatan dengan tulangan tunggal, maka kuat lentur nominal dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{d}{2} \right) \dots \dots \dots (3-11)$$

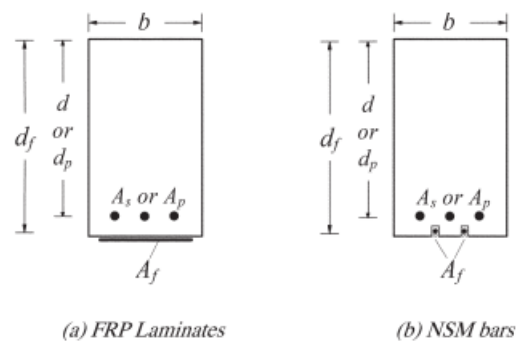
**3.7 Kuat Lentur Glass Fiber Reinforced Polymer**



**Gambar 3.4 Perilaku Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan di Area Lentur**



Dalam perhitungan momen nominal balok beton bertulang yang diperkuat oleh *Fiber Reinforced Polymer*, material yang dijadikan perkuatan itu sendiri juga mempunyai perhitungan desainnya sendiri, dimana akan menentukan seberapa kuat material itu dapat menahan beban yang terjadi.



**Gambar 3.5** Penampang balok yang diperkuat *FRP Laminates* dan *NSM bars*

Karena sifat material *FRP* yang statis sampai mengalami kegagalan, penting untuk menentukan regangan *FRP* itu sendiri yang dapat dirumuskan dengan persamaan;

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \dots \dots \dots (3-12)$$

Dimana  $\epsilon_{bi}$  adalah tegangan awal media *FRP* dan  $d_f$  adalah tinggi efektif *FRP* terhadap penampang balok.

Tegangan efektif dari *FRP* sendiri dapat dihitung dengan persamaan;

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \dots \dots \dots (3-13)$$

Momen lentur nominal dari *FRP* dapat dihitung dengan persamaan;

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \dots \dots \dots (3-14)$$

Keterangan:

- $M_n$  : Momen lentur nominal
- $A_s$  : Luas penampang tulangan
- $f_s$  : Tegangan leleh baja

$\psi_f$  : Faktor reduksi *FRP*  
 $A_f$  : Luas penampang *FRP*  
 $f_{fe}$  : Tegangan efektif *FRP*

### 3.8 Kekakuan Elastik Balok

Kekakuan (*stiffness*) adalah kemampuan suatu elemen untuk bersifat kaku atau tidak elastis. Kekakuan juga merupakan ukuran tegangan yang dibutuhkan untuk mengubah satuan bentuk suatu bahan. Besaran kekakuan suatu bahan adalah modulus elastisitas, yang didapat dengan membagi tegangan satuan yang diterima bahan dengan perubahan satuan bentuk bahan tersebut. Kekakuan balok dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K = \frac{P}{\delta} \dots \dots \dots (3-15)$$

Dengan:

$K$  : kekakuan (kN/mm)  
 $P$  : beban (kN)  
 $\delta$  : lendutan (mm)

### 3.9 Finite Element Method (FEM)

*Finite Element Method (FEM)* atau yang biasa disebut *Finite Element Method (FEA)* adalah prosedur numerik yang biasa dipakai untuk menyelesaikan suatu masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*) seperti elektromagnetis, perpindahan panas, analisis tegangan pada struktur, dan aliran fluida. Metode tersebut digunakan pada masalah-masalah rekayasa dimana *analytical solution/exact solution* tidak dapat menyelesaikannya. Inti dari *Finite Element Method* adalah membagi suatu benda yang akan dianalisis menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, bagian-bagian kecil inilah yang disebut elemen hingga. Tiap elemen yang satu

dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibuat persamaan matematika yang merupakan representasi benda tersebut. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut meshing. Dengan menggunakan metode elemen hingga, kita dapat mengubah suatu masalah yang mempunyai jumlah derajat kebebasan tidak terhingga menjadi suatu masalah yang mempunyai jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya menjadi lebih sederhana. Tujuan utama *Finite Element Analysis* yaitu untuk memperoleh nilai pendekatan dari tegangan yang terjadi. Sebaliknya, pendekatan dengan *Finite Element Method* adalah suatu analisa pendekatan yang berdasarkan asumsi peralihan atau asumsi tegangan, dapat juga berdasarkan kombinasi dari kedua asumsi pada setiap elemennya. Secara umum metode elemen hingga memiliki beberapa keunggulan, diantaranya:

1. Metode elemen hingga dapat digunakan pada berbagai masalah, analisa medan magnet, analisa tegangan dan sebagainya.
2. Metode elemen hingga tidak membatasi geometri dari benda apapun yang dimodelkan.
3. Pembebanan yang dilakukan tidak terbatas.
4. Data material yang didefinisikan tidak terbatas atau dibatasi, sehingga data material pada elemen tersebut dapat diatur sesuai kebutuhan.
5. Dapat melakukan penggabungan beberapa tipe elemen seperti pada beton bertulang.

Metode pelaksanaan analisa sebuah struktur menggunakan metode elemen hingga secara garis besar dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

1. Membagi struktur menjadi elemen hingga (diskretisasi).
2. Menyusun formulasi sifat dari tiap-tiap elemen.
3. Menggabungkan elemen hingga dan formulasinya menjadi elemen utuh atau elemen dari struktur.
4. Memberikan beban sesuai rencana.
5. Menentukan kondisi batas (tergantung dari tipe tumpuan struktur).
6. Menyelesaikan persamaan yang terbentuk (hasilnya berupa *displacement* pada batas-batas antar elemen).
7. Menghitung tegangan dan gaya dalam dari elemen (berdasarkan formulasi sifat tiap-tiap elemen).

