

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Setiap konstruksi bangunan terdiri atas bagian-bagian yang memiliki fungsi tertentu. Salah satunya yaitu balok yang berguna untuk menyangga lantai yang terletak di atasnya. Selain itu, balok juga dapat berperan sebagai penyalur momen menuju ke bagian kolom bangunan. Balok mempunyai karakteristik utama yaitu lentur. Dengan sifat tersebut, balok merupakan elemen bangunan yang dapat diandalkan untuk menangani gaya geser dan momen lentur. Pendirian konstruksi balok pada bangunan umumnya mengadopsi konstruksi balok beton bertulang. Balok beton terlentur didesain untuk memikul momen lentur dengan menggunakan penampang bertulangan ganda, sebab ditinjau dari mekanisme lentur penampang bertulangan ganda mempunyai daktilitas yang lebih besar daripada penampang bertulangan tunggal.

Beton merupakan salah satu bahan material yang mendominasi pemakaian bahan konstruksi di bidang teknik sipil, baik pada bangunan gedung, jembatan, bendung, maupun konstruksi yang lain. Hal ini disebabkan bahan pembuatan beton mudah didapat, lebih murah, praktis dalam pengerjaannya dan mampu memikul beban yang cukup besar. Secara sederhana, beton dibentuk oleh pengerasan campuran antara semen, air, agregat halus (pasir), dan agregat kasar (batu pecah atau kerikil). Pembuatan beton terkadang ditambahkan campuran bahan lain (*admixture*) untuk memperbaiki kualitas beton. Campuran antara semen dan air akan membentuk pasta semen, yang berfungsi sebagai bahan ikat, sedangkan pasir dan kerikil merupakan bahan agregat yang berfungsi sebagai bahan pengisi dan sekaligus sebagai bahan yang diikat oleh pasta semen. Ikatan antara pasta semen dengan agregat menjadi kesatuan yang kompak dan dengan berjalan waktu akan menjadi keras serta padat.

Nilai kuat tekan beton relatif tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan bersifat getas. Nilai kuat tariknya hanya berkisar antara 9% - 15% saja dari kuat tekannya (Istimawan Dipohusodo,1999). Pada penggunaan beton sebagai komponen struktural bangunan, umumnya diperkuat dengan batang seperti tulangan baja sebagai bahan yang dapat bekerja sama dan mampu membantu kelemahannya, terutama pada bagian yang menahan gaya tarik. Dalam hal ini batang tulangan baja bertugas memperkuat dan menahan gaya tarik, sedangkan beton hanya diperhitungkan menahan gaya tekan. Komponen dengan susunan tersebut disebut dengan struktur beton bertulang.

Kerja sama antara bahan beton dan baja tulangan hanya dapat terwujud dengan didasarkan pada keadaan sebagai berikut:

1. Lekatan sempurna antara batang tulangan baja dengan beton keras yang membungkusnya sehingga tidak terjadi penggelinciran di antara keduanya.
2. Beton yang mengelilingi batang tulangan baja bersifat kedap sehingga mampu melindungi dan mencegah terjadinya karat pada baja.
3. Angka muai kedua bahan hampir sama, di mana untuk setiap kenaikan suhu satu derajat celcius angka muai beton 0,00001 sampai 0,000013, sedangkan baja 0,000013, sehingga perbedaan nilai muai dapat diabaikan.

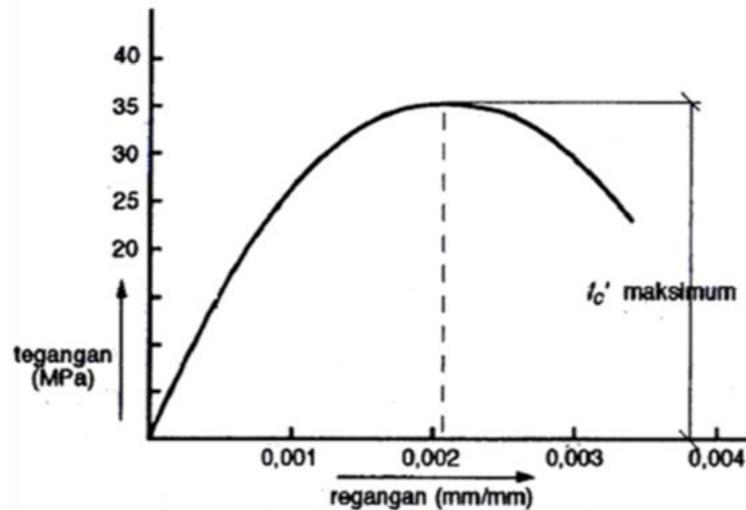
3.2 Sifat Bahan Penyusun Balok Beton Bertulang

3.2.1 Bahan Beton

Pada beton bertulang, yang menjadi perhatian utama adalah bagaimana perilaku komponen struktur pada waktu menahan berbagai beban antara lain: gaya aksial, lenturan, gaya geser, puntiran ataupun merupakan gabungan dari gaya-gaya tersebut. Perilaku tersebut tergantung pada hubungan tegangan-regangan yang terjadi pada beton dan juga jenis tegangan yang dapat ditahannya. Karena kelemahan beton, maka yang diperhitungkan adalah beban yang bekerja dengan baik pada daerah tekan penampang, dan hubungan tegangan-regangan yang timbul karena pengaruh gaya

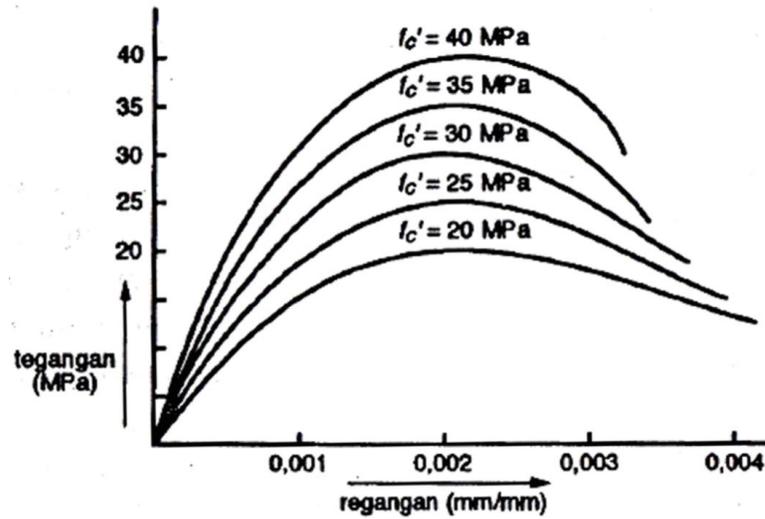
tekan tersebut digunakan sebagai dasar pertimbangan.

Hubungan tegangan-regangan pada beton di daerah yang mengalami tekan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Regangan-Tegangan Beton

Kuat tekan beton diwakili dengan tegangan tekan maksimum (f'_c) dengan satuan 22N/mm^2 atau Mpa dan dalam satuan SI menjadi kg/cm^2 . Untuk struktur beton bertulang pada umur 28 hari umumnya memiliki kuat tekan 17-30 Mpa, dan struktur beton pratekan dibutuhkan memiliki kuat tekan 30-45 Mpa. Untuk keperluan khusus, beton *ready-mix* mampu menghasilkan 62 Mpa. Kuat tekan beton (f'_c) yang diperoleh dari pengujian standar ASTM (*American Society for Testing Materials*) C39-86, bukanlah tegangan yang timbul pada saat beton hancur, melainkan tegangan maksimum pada saat regangan beton (ϵ_b) mencapai nilai $\pm 0,002$. Hal ini dapat dilihat dengan jelas pada beton dengan berbagai mutu.



Gambar 3.2. Berbagai Kuat Tekan Beton

Berdasarkan teori elastisitas bahwa kemiringan kurva kuat tekan beton pada tahap awal menggambarkan nilai modulus elastisitasnya. Karena kurva pada beton berbentuk lengkung, berarti nilai regangan tidak berbanding lurus dengan tegangan berarti bahan beton tidak sepenuhnya bersifat elastis, sedangkan nilai modulus elastisitas berubah sesuai dengan kekuatannya. Sesuai dengan SNI T-15-199-03, bahwa penetapan modulus elastisitas beton sebagai berikut:

$$E_c = 0,0043 \cdot W_c^{1,5} \cdot \overline{f'_c} \quad (3.1)$$

dengan

E_c = Modulus elastisitas beton (Mpa)

W_c = Berat isi beton (kg/m^3)

f'_c = Kuat tekan beton (Mpa)

Rumus empiris tersebut hanya untuk beton dengan berat isi berkisar antara $1500 - 2500 \text{ kg}/\text{m}^3$. Untuk beton dengan kepadatan normal berat isi $\pm 23 \text{ kg}/\text{m}^3$ dapat digunakan nilai $E_c = 4700 \cdot \overline{f'_c}$.

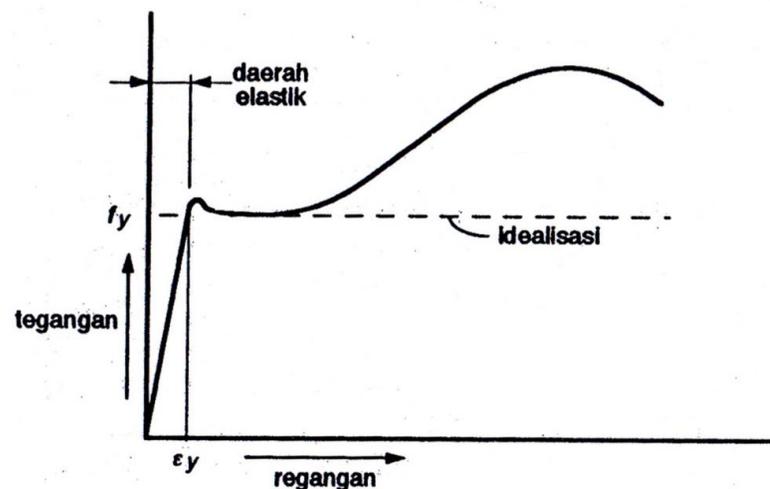
Tabel 3.1. Nilai Modulus Elastisitas Beton (E_c) berbagai mutu beton

$f'c$ (Mpa)	E_c (Mpa)
17	19.500
20	21.000
25	23.500
30	25.700
35	27.800
40	29.700

Sumber : Struktur Beton Bertulang, Istimawan Dipohusodo (1994).

3.2.2 Bahan Baja Tulangan

Sifat umum dari beton, yaitu sangat kuat terhadap beban tekan, bersifat getas/mudah patah atau rusak terhadap beban tarik. Untuk itu agar beton dapat bekerja dengan baik dalam suatu sistem struktur, perlu dibantu dengan memberinya perkuatan penulangan yang akan mengemban tugas menahan gaya tarik yang akan timbul di dalam struktur tersebut. Sifat fisik batang tulangan baja yang paling penting untuk digunakan dalam perhitungan perencanaan beton bertulang adalah tegangan leleh (f_y) dan modulus elastisitas (E_s). Suatu diagram hubungan regangan-tegangan tipikal untuk batang tulangan baja dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3. Diagram Tegangan-Regangan Batang Tulangan Baja

Tegangan leleh (f_y) adalah tegangan baja pada saat mana meningkatnya tegangan tidak disertai lagi dengan peningkatan regangannya. Menurut SK SNI T-15-199-03 bahwa modulus elastisitas baja (E_s) adalah 200.000 *Mpa*, sedangkan modulus elastisitas untuk beton prategang harus dibuktikan melalui pengujian.

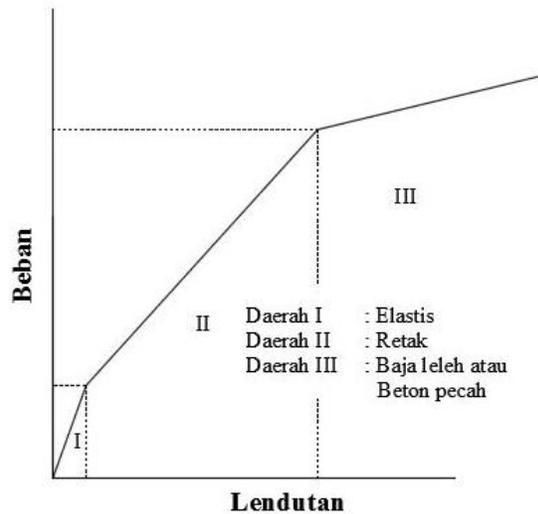
3.3 Pola Keruntuhan Balok

Beton mempunyai sifat susut dan rangkak. Susut adalah pemendekan beton selama proses pengerasan dan pengeringan pada temperature konstan, sedangkan rangkak terjadi pada beton yang dibebani secara tetap dalam jangka waktu yang lama. Oleh karena itu pada balok beton dikenal istilah short-term (immediate) deflection dan long-term deflection.

Nilai kuat tekan beton relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan yang bersifat getas. Kuat tarik yang dimiliki beton hanya berkisar antara 9-15% dari kuat tekannya karenanya sering kali dalam perencanaan kuat tarik beton dianggap sama dengan nol. Dengan menambahkan baja tulangan pada daerah tarik pada beton, maka kelemahan tarik beton dapat ditanggung oleh baja tulangan yang memiliki kuat tarik yang lebih besar.

Balok beton dapat retak ketika menahan momen lentur. Sewaktu serat bawah tertarik (momen positif), beton sebenarnya bisa menahan tegangan tarik tersebut pada kekuatan yang sangat kecil. Perilaku keruntuhan yang dominan pada struktur balok umumnya adalah lentur, hal ini akan terjadi jika rasio bentang (L) dan tinggi balok cukup besar. Jika rasio L/h kecil maka digolongkan sebagai balok tinggi (*deep beam*), keruntuhan geser dominan.

Perilaku keruntuhan balok beton bertulang diatas dua tumpuan dapat digambarkan dalam bentuk kurva beban-lendutan pada Gambar 3.4 berikut :



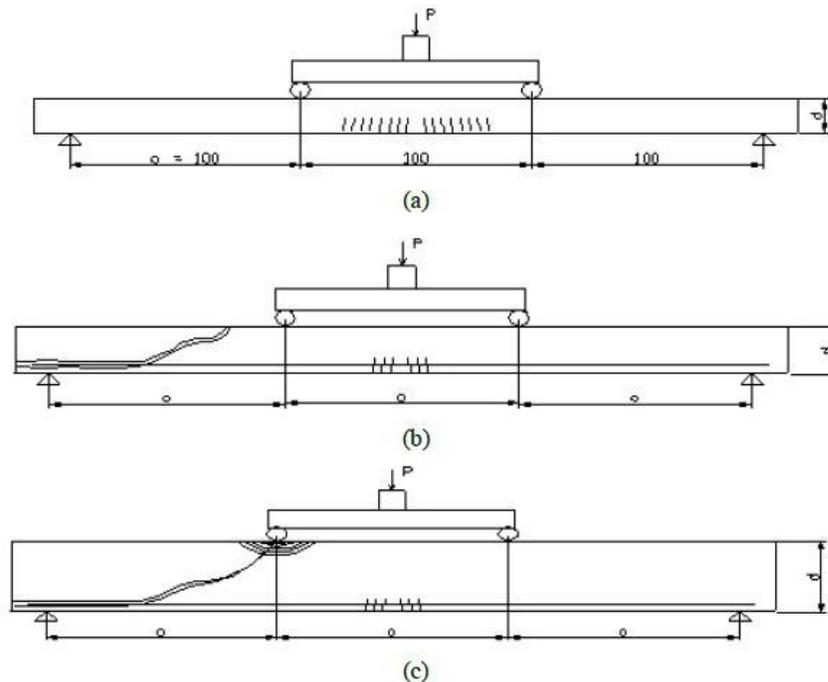
Gambar 3.4 Perilaku Beban-Lendutan Struktur Beton

Tipe keruntuhan balok sangat tergantung pada kelangsingan balok. Kelangsingan balok dinyatakan dengan a/d untuk beban terpusat, dimana a adalah panjang geser (*shear span*). Keruntuhan suatu balok dapat terjadi menurut salah satu dari tiga ragam keruntuhan ini, (Nawy, 1998):

1. Keruntuhan lentur (*flexural failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok dengan harga $a/d > 5,5$ dimana arah retak vertikalnya ditengah bentang sepanjang kira-kira $1/3$ bentang. Retak halus vertikal mulai terbentuk ditengah bentang pada tingkat beban $\pm 50\%$ dari bebankeruntuhan lentur. Dengan meningkatnya beban, retak menyebar di daerah tengah bentang, retak awal mulai melebar dan merambat kearah garis netral dan lendutan meningkat. Bila penulangan memanjang balok *under-reinforced*, keruntuhan terjadi secara daktil yang diawali oleh lelehnya tulang lentur.
2. Keruntuhan tarik diagonal (*diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi setelah keretakan miring tanpa peringatan yang cukup, yang terjadi karena kuat tarik diagonal lebih kecil dari kuat lentur. Keruntuhan ini terjadi pada balok dengan resiko a/d sekitar $2,5 - 5,5$. Keretakan dimulai dengan terbentuknya retak lentur vertikal di tengah bentang, yang akan menyebar akibat meningkatnya

beban ke daerah dengan momen lebih kecil dan gaya geser besar, sehingga terjadi keretakan lentur geser. Dengan meningkatnya gaya geser, retak akan melebar dan merambat sampai ke sisi balok runtuh. Keruntuhan bersifat getas dan lendutan yang terjadi relative kecil.

3. Keruntuhan geser tekan (*shear compression failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi setelah retak lentur geser terjadi, kemudian retak merambat ke belakang sepanjang tulangan lentur. Keretakan ini akan melepaskan lekatan tulangan memanjang, dan balok akan berkelakuan seperti busurdua sendi, yang diakhir dengan hancurnya beton tekan disisi atas balok. Keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio a/d antara 1,0 – 2,5, keruntuhan relatif kurang getas karena terjadi redistribusi tegangan, tetapi secara umum masih tergolong keruntuhan getas dengan peringatan batas.



Gambar 3.5 Pola Keruntuhan: (a) keruntuhan lentur; (b) keruntuhan tarik diagonal; (c) keruntuhan geser tekan

Sumber: Dr. Edward G. Nawy, P.E. 1998

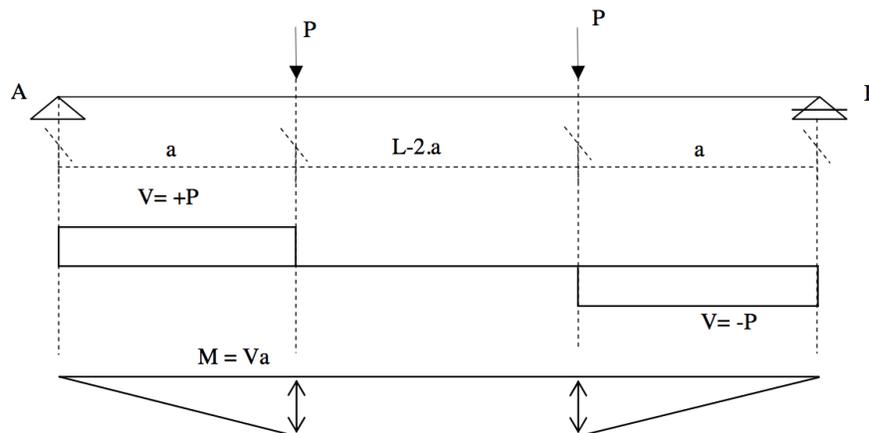
3.4 Lentur Murni pada Balok Beton Bertulang

Bila suatu penampang beton bertulang yang dibebani lentur murni dianalisis, pertama-tama perlu dipakai sejumlah kriteria agar penampang itu mempunyai probabilitas keruntuhan yang layak pada keadaan batas hancur.

Anggapan-anggapan yang digunakan dalam menganalisis beton bertulang yang diberi beban lentur murni adalah :

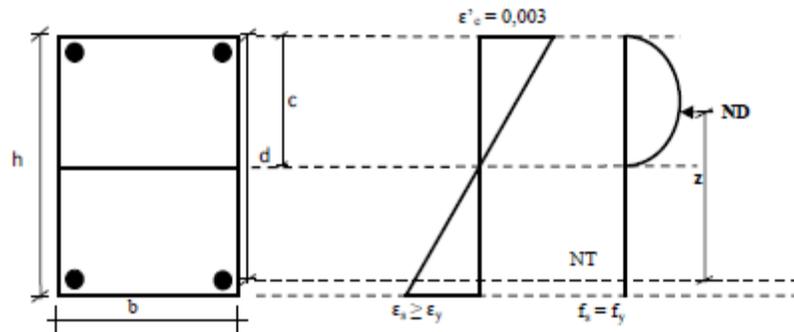
1. Beton tidak dapat menerima gaya tarik karena beton tidak mempunyai kekuatan tarik.
2. Perubahan bentuk tanpa berupa pertambahan panjang dan perpendekan (regangan tarik dan tekan) pada serat-serat penampang, berbanding lurus dengan jarak tiap serat ke sumbu netral. Ini merupakan kriteria yang kita kenal, yaitu penampang bidang datar akan tetap berupa bidang datar.

Tinjauan sebuah balok beton bertulang tertumpu bebas dengan dua beban terpusat P di atasnya, bila berat balok sendiri diabaikan, maka diagram gaya lintang dan diagram momen lentur disajikan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 3.6 Balok Dibebani Lentur Murni

Di antara kedua beban P gaya lintang V adalah nol dan momen lentur M konstan, sehingga balok ini mendapat beban lentur murni. Berdasarkan anggapan-anggapan yang telah ditemukan di atas, dapat dilakukan pengujian regangan,



Gambar 3.8 Diagram Tegangan Dan Regangan

3.5 Perkuatan Balok Beton Bertulang

Perkuatan struktur menurut Triwiyono (2004) dilakukan untuk bangunan yang riskan terhadap beban baru yang akan harus didukung, sehingga perlu meningkatkan kemampuan bangunan tersebut atau menambahkan elemen struktur baru yang tidak tersedia atau dianggap tidak ada pada saat struktur di bangun. Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya pencegahan sebelum struktur mengalami kehancuran. Sedangkan perbaikan struktur diterapkan pada bangunan yang telah rusak, yaitu merupakan upaya untuk mengembalikan fungsi struktur seperti semula setelah terjadi penurunan perkuatan. Jika bangunan tidak segera ditangani perbaikan atau perkuatannya, kerusakan dapat berlanjut lebih parah lagi. Agar bangunan yang sudah rusak dapat terus difungsikan, diperlukan tindakan rehabilitasi yang dapat berupa perbaikan (*retrofit*) atau perkuatan (*strengthening*).

3.7.1 Metode Perkuatan Struktur Beton Bertulang

Metode perkuatan yang umumnya dilakukan adalah :

1. Memperpendek bentang (L) dari struktur dengan konstruksi beton ataupun dengan konstruksi baja.
2. Memperbesar dimensi lebar balok (b) dan tinggi balok (h) dari pada konstruksi beton.
3. Menambah plat baja.

Berdasarkan metode perkuatan di atas, ada beberapa kendala yang dijumpai di lapangan sebagai berikut:

1. Waktu pelaksanaan yang lama (menunggu proses pengeringan dari material perkuatan hingga mampu memikul beban).
2. Perlunya ruang kerja yang cukup luas sehingga harus menghentikan aktifitas dan juga harus membongkar terlebih dahulu *plumbing* maupun *ducting* AC yang ada
3. Perlunya alat bantu seperti penyanggah sementara
4. Adanya sambungan-sambungan apabila bentang yang harus diperkuat cukup panjang (metode perkuatan dengan plat baja).
5. Perlunya lapisan pelindung untuk meningkatkan keawetan terhadap korosi.

Sejak tahun 90-an, mulai banyak digunakan metode baru dalam melakukan perkuatan yaitu dengan menggunakan "*Fiber Reinforced Plastic (FRP)*". Prinsip metode perkuatan dengan menggunakan FRP menyerupai penggunaan Pelat Baja. Tiga prinsip penggunaan FRP dalam perkuatan struktur adalah :

1. Meningkatkan kapasitas momen lentur pada balok atau plat dengan menambahkan FRP pada bagian tarik.
2. Meningkatkan kapasitas geser pada balok dengan menambahkan FRP di bagian sisi pada daerah geser.
3. Meningkatkan kapasitas beban axial dan geser pada kolom dengan menambahkan FRP di sekeliling kolom.

FRP dapat digunakan pada perkuatan :

1. Lentur baik pada balok dan plat, bagian tumpuan maupun lapangan
2. Geser pada balok dan kolom
3. Axial pada kolom
4. Lentur pada dinding (dinding penahan, silo dll)

3.7.2 Pelat Baja

Pelat baja merupakan salah satu bentuk material komposit yang dibuat dari dua atau lebih material penyusun yang saling memiliki perbedaan sifat fisik dan kimia,

yang jika dikombinasikan akan menghasilkan material berkarakteristik berbeda dengan material-material penyusunnya. Material komposit tersusun atas dua komponen utama yaitu matriks dan material penguat (reinforcement). Pelat baja bertugas sebagai material penguat. Sedangkan untuk matriksnya biasanya dipergunakan resin polimer semacam *epoxy*. Matriks resin ini berfungsi untuk mengikat material-material penguat. Dikarenakan pelat baja hanya tersusun oleh dua material tersebut maka sifat-sifat pelat baja juga hanya ditentukan oleh kedua material ini. Pelat baja yang digunakan pada penelitian ini adalah lembaran pelat strip baja yang dipotong-potong. Jenis ini digunakan karena mempunyai elastisitas yang baik sehingga mudah dalam pemasangannya.

3.7.3 Lem Perekat Sikadur-31 CF Normal

Dalam penggunaan pelat baja, memerlukan suatu perekat kimia untuk memastikan pelat baja dapat terpasang dengan sempurna dan tidak mengelupas. Zat perekat ini terdiri dari dua macam bahan yaitu resin dan *hardener*, yang harus dicampur sebelum digunakan untuk merekatkan stripelastik baja ke balok.

Sifat dari perekat ini yaitu dapat mengeras dengan waktu yang singkat. Oleh karena itu dalam pemasangannya memerlukan ketelitian dan metode kerja yang cepat dan akurat. Dalam penelitian ini perekat yang digunakan adalah epoxy adhesive jenis Sikadur[®]-CF Normal yang terdiri dari dua komponen, yaitu komponen A yang berwarna putih dan komponen B yang berwarna abu-abu tua. Perbandingan antara campuran komponen A: komponen B adalah 2: 1 dan warna setelah tercampur adalah abu-abu terang. Konsumsi perekat (bahan A + bahan B) sebesar 0,34 kg/m yang dioleskan pada permukaan beton dan permukaan platstrip secara merata dengan ketebalannya kurang lebih 12 mm setiap sisi. Spesifikasi data teknis epoxy yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut:

Tabel 3.2 Karakteristik Epoxy

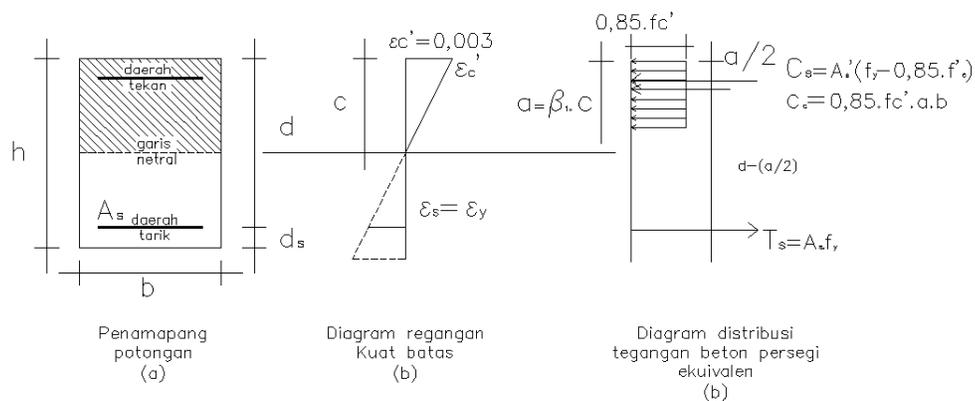
Properties	Epoxy
Modulus – E	12.800 Mpa
Kuat lekat pada beton	> 4 Mpa

Sumber: Sika Technical Data Sheet 2005

Berdasarkan Tabel 3.2 dapat diketahui bahwa perekat yang digunakan mempunyai modulus elastisitas E yang lebih kecil dari modulus elastisitas beton ($E_c=20.000$ MPa), sehingga dapat dikatakan *epoxy* lebih lunak dari beton.

3.6 Formula Perkuatan Lentur Dengan SK SNI

3.8.1 Balok Beton Tanpa Menggunakan Pelat Baja



Gambar 3.9 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tulangan Rangkap

a. Keadaan Balanced

$$\frac{c_b}{\varepsilon_c} = \frac{d}{\varepsilon_c + \left[\frac{f_y}{\varepsilon_s} \right]}$$

$$c_b = \frac{600d}{600 + f_y}$$

$$a = 0,85c_b\varepsilon_s$$

$$\varepsilon_y = \frac{fy}{\varepsilon_s}$$

Karena : $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, kriteria untuk melelehnya baja tulangan tekan telah terpenuhi

b. Keadaan Sebenarnya

- Anggap baja tulangan leleh, maka $f_y = f_s$.

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times a \times B =$$

$$C_s = A_s' f_y - 0,85 f'_c T_s = A_s \times f_y$$

$$T_s = C_c + C_s$$

Maka didapat nilai a

$$C_u = \frac{a}{\beta}$$

Cek baja tulangan :

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_u - d'}{C_u} \varepsilon_c < \varepsilon_y$$

Ternyata anggapan baja tulangan tekan meleleh tidak terpenuhi. Anggaplah letak garis netral sebagai bilangan x . Dengan menyamakan $(C_c + C_s)$ dengan T_s , menjadi suatu persamaan kuadrat.

Di mana :

$$\varepsilon_s' = \frac{a - d'}{a} \varepsilon_c$$

$$f_s' = \varepsilon_s' \times E_s$$

$$C_s = (f_s' - 0,85 f'_c) A_s'$$

Sehingga :

$$0,85 f'_c \times a \times B + \frac{a - d'}{a} 0,003 \times 200.000 - 0,85 f'_c A_s' = f_y \times A_s$$

Maka didapat nilai a

$$C_u = \frac{a}{\beta}$$

$$C_c = 0,85 \times f'c \times a \times B$$

$$C_s = f's - 0,85f'c A'_s$$

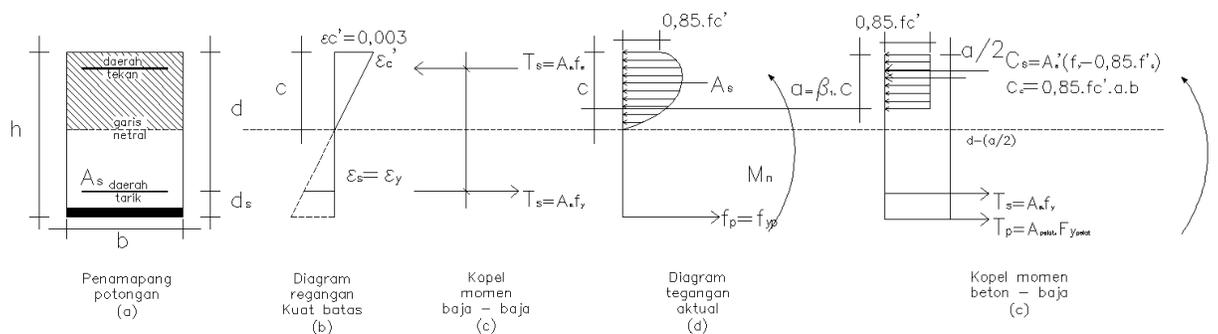
Momen Nominal (M_n) :

$$M_n = C_c d - \frac{a}{2} + C_s d - d'$$

Prediksi beban diterima

$$M_n = \frac{1}{6,1} Pl \quad \text{maka, } P = \frac{6,1M_n}{l}$$

3.8.2 Balok Beton Dengan Menggunakan Pelat Baja



Gambar 3.10 Potongan Dan Gaya-Gaya Pada Balok Dengan Perkuatan Pelat Baja

Kadaan Balanced

$$\frac{C_b}{\varepsilon_c} = \frac{d}{\varepsilon_c + \left[\frac{f_y}{\varepsilon_s} \right]}$$

$$C_b = \frac{600d}{600 + f_y}$$

$$a = 0,85C_b$$

$$\varepsilon_s = \frac{a-d}{a} \times \varepsilon_c > \varepsilon_y = \frac{f_y}{\varepsilon_s}$$

Karena : $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, kriteria untuk melelehnya baja tulangan tekan telah terpenuhi

a. Keadaan Sebenarnya

- Anggap baja tulangan leleh, maka $f_y = f_s$.

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times a \times B$$

$$C_s = A_s' f_y - 0,85 f'_c$$

$$T_s = A_s \times f_{kap} + A_p \times f_{kap\ plat}$$

$$T_s = C_c + C_s$$

Maka didapat nilai a

$$C_u = \frac{a}{\beta}$$

Cek baja tulangan :

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_u - d'}{C_u} \varepsilon_c$$

Karena : $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$,kriteria untuk melelehnya baja tulangan tekan telah terpenuhi

$$C_c = 0,85 \times f'_c \times a \times B$$

$$C_s = f'_s - 0,85 f'_c A_s'$$

Momen Kapasitas (M_{kap}) :

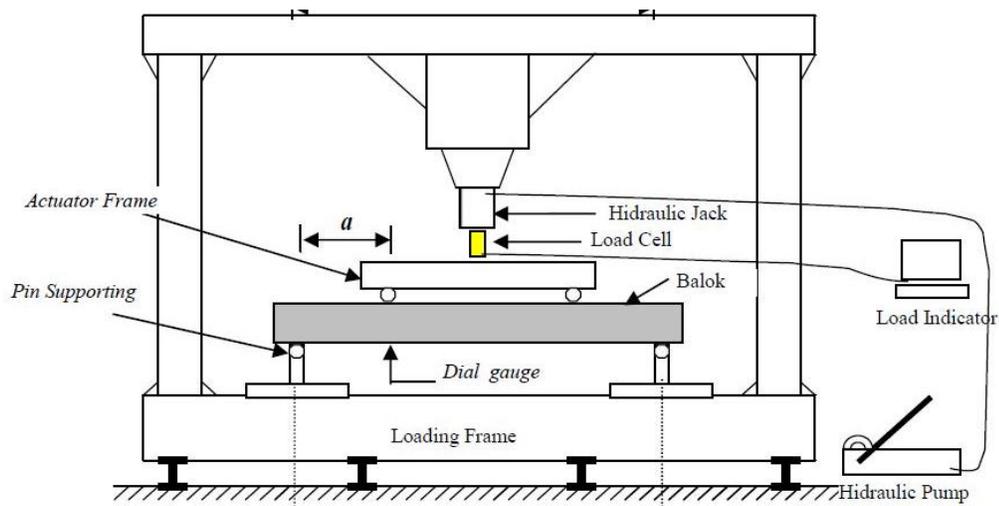
$$M_{kap} = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \times \phi$$

Prediksi beban diterima

$$P = \frac{M_{kap} - 0,669}{0,388}$$

3.7 Pengujian Kuat Tekan Balok Beton Bertulang

Pada penelitian ini akan digunakan metode pengujian balok beton dengan sistem pembebanan dua titik menurut SNI 03-4431-1997. Metode pengujian ini dimaksudkan sebagai acuan dan pegangan dalam melaksanakan pengujian kuat lentur beton di laboratorium. Tujuan dari pengujian ini untuk memperoleh nilai kuat lentur beton normal guna keperluan perencanaan dan pelaksanaan. Pembebanan yang diberikan pada balok adalah beban titik yang distribusikan menjadi 2 beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang seperti yang terlihat pada Gambar 3.14 berikut:



Gambar 3.11 Setting Alat Pengujian Balok

Hubungan beban dan lendutan dapat menggambarkan fleksibilitas dan defleksi yang terjadi pada setiap penambahan beban dari suatu benda uji. Pada pengujian ini data lendutan dari balok diambil pada tengah bentang dan seperempat bentang. Besarnya defleksi diukur dengan menempatkan LVDT pada tempat-tempat tersebut.