BAB 2
DASAR TEORI

2.1 Dasar Teori Beton Bertulang

2.1.1 Pengertian Beton Bertulang

Pada dasarnya beton bertulang merupakan gabungan logis dari dua jenis bahan/ material yaitu beton polos dan tulangan baja. Beton polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi memiliki kekuatan tarik yang rendah. Sedangkan tulangan baja akan memberi kekuatan tarik yang besar sehingga tulangan baja akan memberi kekuatan tarik yang diperlukan. Dengan adanya kelebihan masing-masing elemen tersebut, maka konfigurasi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat saling bekerjasama dalam menahan gaya-gaya yang berkerja dalam struktur tersebut, dimana gaya tekan ditahan oleh beton, dan tarik ditahan oleh tulangan baja.

Baja dan beton dapat bekerja sama atas dasar beberapa hal :

1. Lekatan (*bond*) yang merupakan interaksi antara tulangan baja dengan beton di sekelilingnya, yang akan mencegah slip dari baja relatif terhadap beton.
2. Campuran beton yang memadai yang memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton untuk mencegah karat baja.
3. Angka kecepatan muai yang relatif serupa menimbulkan tegangan antara baja dan beton yang dapat diabaikan di bawah perubahan suhu udara.

2.1.2 Material Pembentuk Beton Bertulang

Unsur utama pembentuk beton adalah semen, air, dan agregat. Agregat disini terdiri dari agregat halus yang umumnya menggunakan pasir dan agregat kasar yang umumnya menggunakan batu kerikil. Selain itu kadang-kadang juga ditambahkan material campuran (*admixture*). Semen dan air membentuk pasta pengikat yang akan mengisi rongga dan mengeras di antara butir-butir pasir dan agregat, sedangkan agregat akan menentukan kekuatan dan kualitas beton.

2.1.2.1 Semen

Semen merupakan suatu jenis bahan yang memiliki sifat yang adesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat. Dalam hal ini bahan semen akan menjadi keras karena adanya faktor air, yang kemudian dinamakan semen hidraulis (*Hydraulic Cement*).

Semen hidrolik yang biasa digunakan pada beton adalah semen portland (*Portland Cement*) yang umumnya membutuhkan sekitar 14 hari untuk mencapai kekuatan yang cukup dan membutuhkan waktu 28 hari untuk mencapai kekuatan rencana.

2.1.2.2 Agregat

Pada material beton, agregat memenuhi sekitar 75 % dari isi total beton, sehingga perilaku beton sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat agregat. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya agregat biasanya terdiri dari 2 macam yaitu agregat halus yang umumnya berupa pasir dan agregat kasar yang pada umumnya berupa kerikil. Agregat halus adalah bahan yang lolos dari saringan no. 4 (lebih kecil dari 3/16 inci, berdasarkan ASTM). Dan agregat kasar adalah bahan-bahan yang berukuran lebih besar.

2.1.2.3 Air

Air merupakan bahan utama dalam campuran beton karena air yang mengakibatkan partikel-partikel semen saling mengikat baik mengikat antar partikel maupun dengan tulangan baja.

2.1.2.4 Bahan Campuran (admixture)

Disamping bahan-bahan utama di atas, terdapat bahan campuran tambahan yang juga sering ditambahkan pada campuran beton, baik sebelum atau ketika sedang mencampur. Campuran *admixture* dapat dipakai untuk mengubah sifat beton agar berfungsi lebih baik atau lebih ekonomis, di antara kegunaannya adalah :

1. Meninggikan daya tahan terhadap kemunduran mutu akibat siklus dari pembekuan-pencairan.

2. Meninggikan kelayanan tanpa menambahkan kadar air
3. Mempercepat perkembangan kekuatan pada usia dini
4. Memperlambat perkembangan
5. Meninggikan kekuatan.

2.1.2.5 Tulangan Baja

Tulangan baja secara umum terdiri atas 2 macam yaitu baja tulangan polos dan baja tulangan berulir.

Pembahasan berikut akan menitikberatkan pada struktur balok beton bertulang segiempat sederhana, sebagai bahan studi literatur penunjang penelitian yang akan dilakukan.

2.1.3 Perilaku Balok Beton Bertulang

2.1.3.1 Tegangan–regangan

Apabila terdapat gaya luar yang membebani suatu balok dengan nilai-yang ditahan oleh beton dan baja tulangan relatif kecil, dan tegangan pada terluar beton lebih kecil dari Modelus tarik, seluruh serat penampang secara efektif dapat menahan beban tersebut bersama dengan baja tulangan. Distribusi tegangan dan regangan dalam penampang diilustrasikan dalam Gambar 2.1.(a).

Karena deformasi baja tulangan dan serat beton pada lapis yang sama adalah sebanding, gaya internal baja tulangan dapat ditentukan melalui perbandingan regangan. Konsep material homogen berlaku, dan hubungan antar momen dan tegangan dapat dirumuskan melalui persamaan :

$$f = \frac{M.y}{I} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.1$$

dimana :

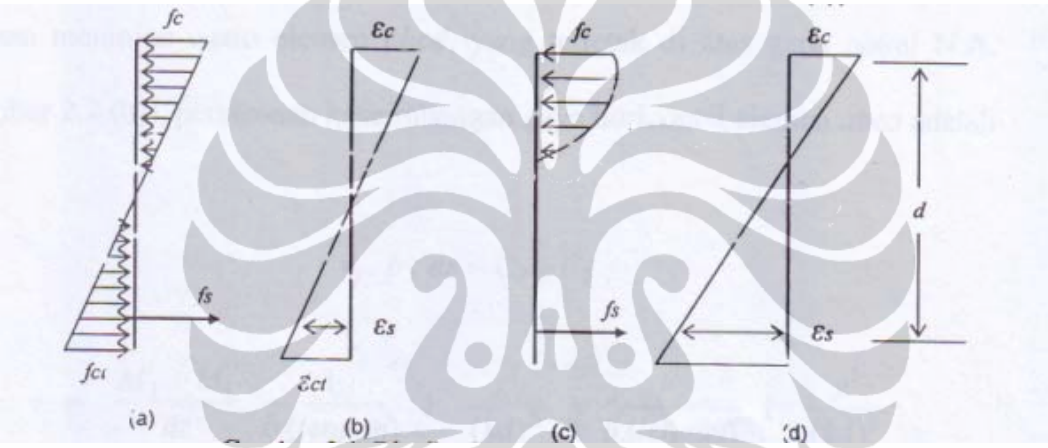
f = tegangan pada serat terluar

M = momen lentur penampang

y = jarak ke serat terluar

I = momen inersia terhadap sumbu netral.

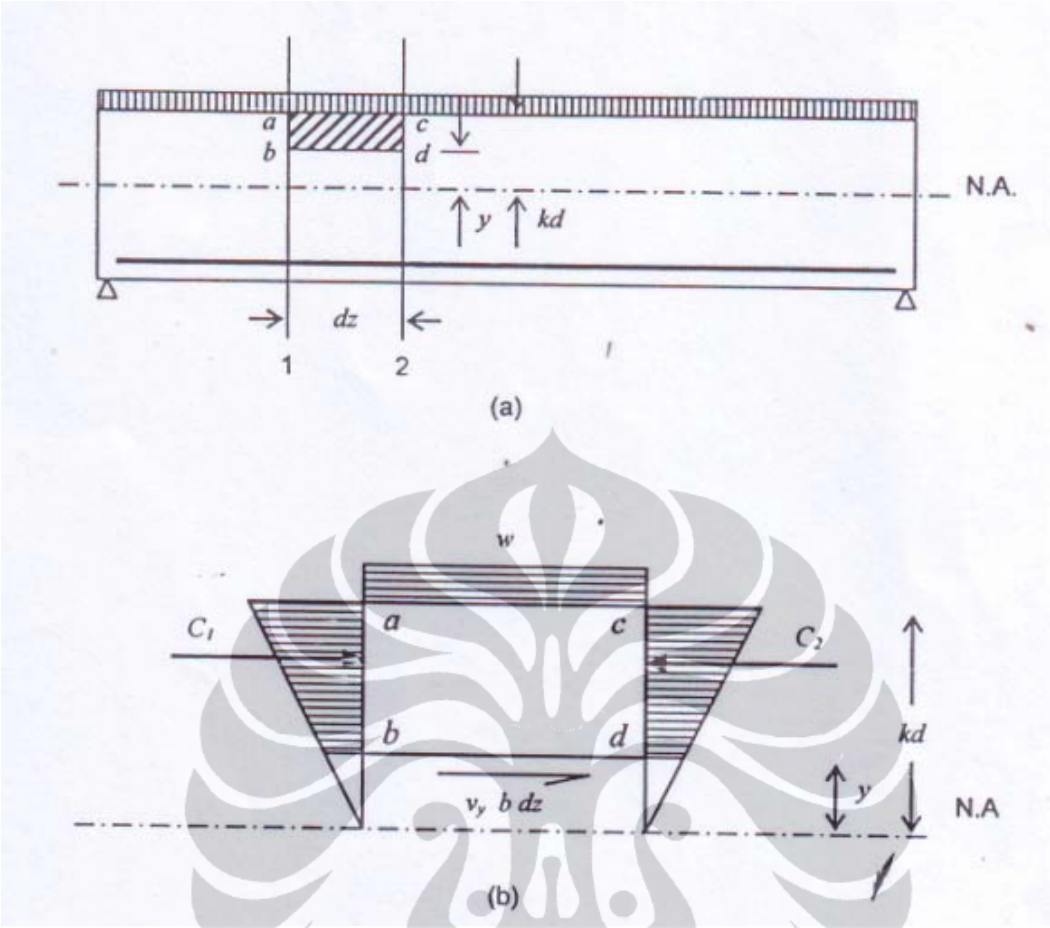
Apabila beban tersebut meningkat hingga kekuatan tarik beton dilampaui, tegangan tarik pada serat terluar akan lebih besar dari Modelus tarik, dan retak akibat tarik akan terjadi. Karena serat beton tarik telah mengalami retak, maka pengaruhnya dalam menahan gaya internal dapat diabaikan. Seluruh tarikan akan ditahan oleh baja tulangan. Dalam kondisi ini distribusi tegangan beton pada daerah tekan akan berbentuk kurva. (gambar 2.1(c))



Gambar 2.1. Distribusi Tegangan-Regangan Penampang Balok

2.1.3.2 Geser

Geser Horizontal – suatu balok sederhana dengan pembebanan yang merata *w* diilustrasikan dalam Gambar 2.2.(a).



Gambar 2.2. Tegangan Geser Horizontal dalam Balok

Dengan meninjau suatu elemen *abcd,* yang terletak di atas garis netral N.A (Gambar 2.2.(b)), persamaan keseimbangan gaya horizontal elemen *abcd* adalah :

$$v_y.b.dz = C_2 - C_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.2$$

$$v_y = \frac{M_2.M_1}{dz}\frac{1}{b.(lengan)} - 1\frac{y^2}{(kd)^2} = -\frac{V}{b.(lengan)}1\frac{y^2}{(kd)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.3$$

dimana v_y adalah tegangan geser horizontal pada titik sejarak y dari garis netral dan *b* adalah lebar penampang balok.

Persamaan tegangan geser horizontal di atas, berlaku untuk posisi serat tekan pada penampang suatu balok.

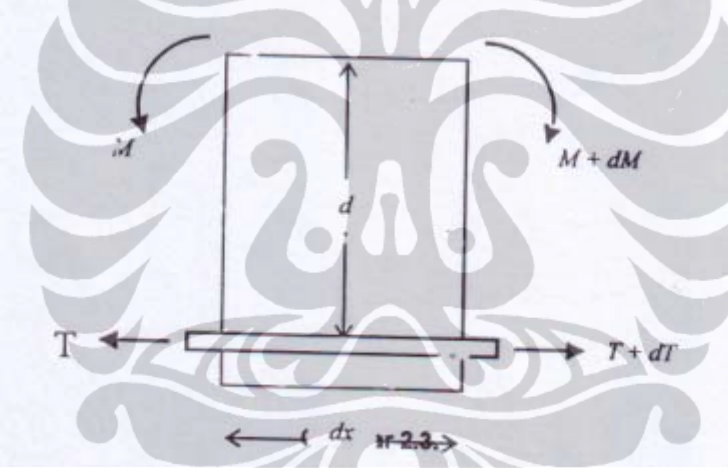
2.1.3.3 Daya Lekat (Bonding).

Daya Lekat Beton dan Baja Tulangan – Gaya luar yang bekerja pada struktur beton bertulang akan ditahan bersama oleh beton dan baja tulangan.

Untuk menunjang hal tersebut, slip atau gelincir antara beton dan tulangannya diharapkan tidak terjadi, sehingga diperlukan adanya daya lekat *(bonding)* yang memadai antara beton dan baja tulangan.

Adanya daya lekat antara beton dan baja tulangan membuat seolah-olah beton dan tulangan memiliki perilaku sebagai material homogen, yaitu nilai regangan pada serat beton maupun tulangan adalah sama dan berbanding lurus dengan jarak dari sumbu netral dan maksimum pada serat terluar.

Tarikan di sepanjang suatu batang tulangan bervariasi tergantung dari besarnya momen lentur pada bagian konstruksi balok tersebut. Untuk keseimbangan, perubahan dalam tarikan harus diimbangi oleh pelekatan antara baja dan beton.



Gambar 2.3 Segmen Kecil *dx* dari Suatu Balok

Gambar 2.3. memperlihatkan suatu panjang segmen kecil *dx* dari suatu balok yang mengalami suatu momen lentur yang berubah dari M menjadi *M + dM*. Perubahan momen menyebabkan tarikan dalam baja berubah dari T menjadi *T + dT* sepanjang tulangan tersebut.

Kalau z adalah lengan dari tulangan, maka :

$$M = Tz \quad \text{.....} 2.4$$

dan

$$M + \delta M = (T + \delta T)z \quad \text{.....} \; 2.5$$

karena itu

$$\delta M = \delta T z \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.6$$

dari teori lentur

$$\frac{\delta M}{\delta x} = V \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.7$$

gaya lintang akibat beban-beban ultimit pada tampang

karena itu

$$\delta M = \delta T = V \delta x \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.8$$

Untuk keseimbangan

perubahan dalam tarikan δT = gaya lekat antara tulangan baja dan beton

= tegangan lekat X luas permukaan tulangan

karena itu

$$\delta T = f_{bs} \delta_x \sum \mu_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.9$$

di mana f_{bs} adalah tegangan lokal ultimit dan $\sum \mu_s$ adalah jumlah keliling efektif dari berkas tulangan pada tampang tersebut.

Dari persamaan 2.8 & 2.9

$$\frac{V \delta x}{z} = f_{bs} \delta_x \sum \mu_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.10$$

Sehingga agar batang tulangan dan beton dapat bekerja sama untuk menahan gaya yang harus dipikul, tegangan lokal beton dan tulangan baja harus dihitung memakai persamaan berikut :

$$f_{bs} = \frac{V}{\sum \mu_s d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.11$$

dimana, f_{bs} tegangan lokal, V gaya geser penampang, $\sum u_s$ jumlah keliling efektif dari tulangan penampang, dan d tinggi efektif penampang.

Tabel 2.1 Tegangan Lokal Ultimit dalam Balok (N/mm^2)

TIPE BATANG	MUTU BETON			
	20	25	30	≥ 40
Batang polos	1,7	2,0	2,2	2,7
Batang profil, tipe 1	2,1	2,5	2,8	3,4
Batang profil, tipe 2	2,5	3,0	3,4	4,1

Sumber : Perencanaan Beton Bertulang, edisi II. W.H. Mosley & J.H. Burgey

Kegagalan dalam peletakan, menyebabkan batang tulangan terelincir di dalam beton sehingga aksi komposit antara beton dan baja tulangan tidak akan terjadi. Peletakan lokal harus diperiksa pada penampang di mana terdapat gaya lintang yang besar dikombinasikan dengan momen lentur, seperti pada tumpuan.

2.1.3.4 Daktilitas

Daktilitas merupakan suatu besaran yang mencerminkan kemampuan struktur atau elemen struktur untuk melakukan perubahan bentuk elasto-plastis tanpa mengalami keruntuhan. Biasanya dinyatakan dengan suatu rasio antara perubahan bentuk elasto-plastis total dari struktur atau elemen struktur sebelum runtuh terhadap perubahan bentuknya pada batas elastis. Pada balok dan pelat beton daktilitas dapat dicapai dengan :

- Pemasangan tulangan baja yang tidak tegas dalam menahan gaya tarik
- Membatasi jumlah tulangan tarik pada proporsi yang sedemikian sehingga akan meleleh sebelum daerah tekan beton mengalami keruntuhan.

Terdapat tiga keadaan keruntuhan pada struktur beton bertulang yang mungkin terjadi, yaitu :

- Keruntuhan tarik *(tension failure)*

  Keruntuhan tarik akan terjadi bila persentase baja tulangan suatu penampang balok relatif kecil (balok perkuatan kurang, *underreinforced beams*) sehingga tulangan akan lebih dulu mencapai tegangan lelehnya sebelum tegangan tekan beton mencapai maksimum. Pada tahap ini, regangan baja tulangan $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy}$, dan regangan beton $\varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$, dan akan terus berlanjut hingga $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$. Tanda-tanda keruntuhan ini adalah timbulnya retak-retak pada daerah tarik.
- Keruntuhan imbang *(balance failure)*

  Keruntuhan imbang terjadi apabila beton maupun baja tulangan mencapai regangan dan tegangan maksimumnya secara bersamaan, keruntuhan ini terjadi secara serentak.
- Keruntuhan tekan *(compression failure)*

Keruntuhan tekan terjadi bila persentase baja tulangan suatu penampang balok relatif besar (balok perkuatan berlebihan, *overreinforced beams*), sehingga tegangan di serat beton lebih dulu mencapai kapasitas maksimumnya sebelum tegangan leleh maksimum tulangan baja tercapai. Pada tahap ini, regangan baja tulangan $\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$, dan regangan beton $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$. Keruntuhan terjadi di daerah tekan beton, terjadi secara tiba-tiba dan sering disertai bunyi ledakan beton hancur, dan sebelumnya tidak ada tanda-tanda berupa defleksi yang besar.

Dari ketiga kondisi keruntuhan di atas, keruntuhan tarik digunakan dalam setiap mendesain beton bertulang, dengan dasar faktor keselamatan.

2.2 Desain dan Pemeriksaan Struktur Balok Beton Bertulang tanpa Perkuatan

Suatu struktur balok bertulang harus direncanakan kekuatan untuk menjamin kekuatan struktur balok beton bertulang tersebut dalam menahan beban-beban rencana yang bekerja. Perencanaan kekuatan ini mencakup perhitungan besarnya penulangan/ pembesian yang harus dilakukan agar kriteria kekuatan dapat tercapai.

Struktur balok yang melalui perhitungan perencanaan dinyatakan kuat, harus diperiksa terhadap tiga hal yang penting dalam konstruksi beton bertulang, yaitu : pemeriksaan terhadap daktilitas struktur dengan melakukan pembatasan rasio tulangan, pemeriksaan terhadap kekakuan dengan melakukan analisis defleksi, dan pemeriksaan terhadap pembatasan retak.

Keempat hal di atas, yaitu perencanaan kekuatan, pemeriksaan daktilitas, pemeriksaan kekakuan, dan pemeriksaan pembatasan retak, harus sekaligus dilakukan dalam merencanakan suatu penampang balok beton bertulang agar fungsi dari struktur yang direncanakan dapat tercapai atau dengan kata lain struktur dapat memberikan *performance* kemampulayanan dan keamanan yang baik.

2.2.1 Desain Kekuatan Struktur

2.2.1.1 Desain Kakuatan Struktur Terhadap Lentur

Perencanaan kekuatan struktur terhadap lentur diwujudkan dalam perhitungan perencanaan pembesian lentur.

Perencanaan pembesian (penulangan) yang dilakukan dalam perencanaan kekuatan penampang terhadap lentur dimaksudkan terutama untuk menghitung seberapa besar pembesian yang harus dipasang pada struktur balok agar diperoleh suatu struktur balok beton dengan pembesian yang berperilaku komposit dalam menahan beban rencana yang bekerja. Perilaku struktur komposit sangat diharapkan untuk dapat bekerja dengan baik sebab momen lentur *(bending moment)* yang bekerja menyebabkan timbulnya tegangan tekan dan tegangan tarik pada serat yang berlawanan (tegangan tekan pada serat atas sedangkan tegangan tarik pada serat bawah atau sebaliknya) dalam suatu penampang struktur yang dibebani lentur. Sifat material beton yang sangat baik dalam menahan tegangan tekan namun buruk dalam menahan tegangan tarik dibantu dengan pembesian yang menunjukkan *performance* yang sangat baik dalam menahan tegangan tarik. Perilaku komposit yang baik yang tercapai dengan perencanaan yang baik akan menjamin kekuatan strutur terhadap lentur. Dari sini dapat terlihat bahwa pembesian diperlukan pada serta penampang yang mengalami tegangan tarik.

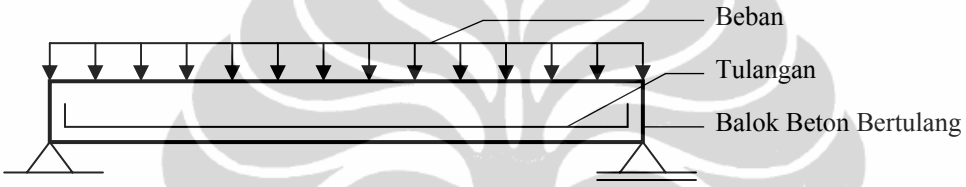
Dalam perencanaan dilakukan asumsi bahwa beton tidak menyumbangkan kekuatan tariknya dalam menahan tegangn tarik yang ada. Asumsi ini diambil dengan melihat kenyataan bahwa kekuatan tarik beton jauh lebih kecil daripada kekuatan tekannya yang dalam SNI 03-2847-2002 pasal 12.2-5 disebutkan bahwa Modelus runtuh beton akibat tegangan tarik (f_r) adalah sebesar $f_r = 0,7\sqrt{fc'}$. Penerapan asumsi ini dalam perencanaan mensyaratkan adanya pembesian pada serat tempat tegangan tekan terjadi cukup mengandalkan sifat menonjol beton yang baik dalam menahan tegangan tekan.

Beton adalah material yang diantaranya memiliki sifat dapat mengalami fenomena rangkak *(creep)* yaitu mengecilnya pori-pori beton yang mengalami pembebanan secara berkelanjutan yang mempengaruhi terjadinya defleksi beton dalam jangka panjang sebagai fungsi waktu akibat bekerjanya beban yang tetap. Fenomena *creep* yang merugikan sebab mengakibatkan adanya penambahan defleksi secara bertahap selama bekerjanya beban ternyata dapat diatasi dengan pemasangan tulangan / pembesian pada serat penampang beton yang menerima

tegangan tekan, yang kemudian akan disebut sebagai tulangan tekan. Dalam pembahasan mengenai pemeriksaan daktilitas dapat ditunjukkan pula bahwa pemasangan tulangan tekan dapat meningkatkan derajat daktilitas struktur, sehingga tingkat keamanan dapat bertambah, dan dalam pelaksanaan pembesian balok, pemasangan tulangan tekan membantu proses pemasangan pembesian geser. Jadi pemasangan tulangan tekan pada struktur balok beton bertulang dapat diharuskan.

Perencanaan kekuatan penampang balok beton bertulang terhadap momen lentur disajikan di bawah ini.

Diberikan suatu struktur balok seperti berikut ini :



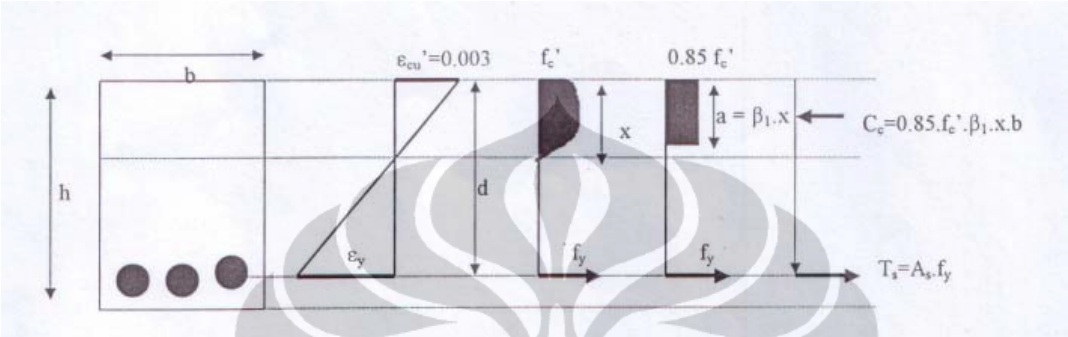
Gambar 2.4 Struktur Balok

Agar struktur beton bertulang di atas sanggup menahan beban yang ada, maka harus ada keseimbangan antara aksi yang ditimbulkan berupa momen lentur akibat beban yang bekerja dengan reaksi yang berupa momen dalam yang disumbangkan oleh kekuatan penampang yang akan direncanakan.

Perencanaan pembesian atau penulangan balok beton berulang ini akan menggunakan metode perencanaan *ultimate* dalam kondisi regangan berimbang yang ditandai dengan tercapainya regangan leleh baja tulangan yang bersesuaian dengan tegangan lelehnya tepat pada saat serat terluar yang tertekan di penampang beton mencapai regangan batas sebesar 0,003. Asumsi dasar yang diambil dalam perencanaan ini adalah regangan berimbang. Tegangan yang terjadi dalam penampang beton pun dengan demikian dapat dicari dengan mengambil secara identik kurva tegangan-regangan beton yang berupa garis lengkung yang dimulai dari garis netral dan berakhir pada serat terluar yang tertekan. Dengan sifat dasar beton yang sangat baik dalam menerima tegangan tekan tetapi kurang baik dalam menerima tegangan tarik, maka dalam perencanaan ini diasumsikan tegangan tarik sepenuhnya dipikul oleh baja tulangan.

Untuk perencanaan pembesian dipilih baja tulangan yang memiliki mutu f_y=400 MPa dan Modelus elastisitas E_s sebesar 200000 MPa, sedangkan material beton direncanakan menggunakan mutu f_c' = 30 Mpa.

Dari struktur di atas, di bawah ini akan digambarkan skema penampangnya beserta diagram regangan dan tegangan serta keseimbangan gaya dalam yang terjadi pada kondisi *ultimate.*



(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 2.5 Skematisasi Diagram Regangan dan Tegangan dalam Penampang Balok Beton Bertulang

Gambar 2.5 secara umum memberikan penjelasan mengenai perilaku regangan dan tegangan beton yang menderita pembebanan dalam kondisi *ultimate*. Diagram tegangan tekan beton yang terlihat dalam gambar 2.9 (c) yang tampil berupa lengkung menjadi persegi seperti tampak dalam gambar 2.2 (d) Penyederhanaan ini diizinkan dalam SNI 03-2847-2002 pasal 12.2 tentang asumsi dalam perencanaan untuk beban lentur dan aksial. Dalam proses penyederhanaan distribusi tegangan tekan beton dari lengkung menjadi persegi ada suatu faktor yang diberi nama β_1 yang dikalikan dengan jarak dari serat terluar tepi tertekan ke garis netral. Faktor β_1 ini mereduksi kedalaman blok diagram tegangan tekan dari x menjadi $\beta_1.x$ sehingga besarnya tegangan tekan yang terjadi yang dihitung dengan penyederhanaan diasumsikan mendekati hasil yang sebenarnya tanpa penyederhanaan.

Dalam pasal 12.2 ayat 7 butir 3 SNI 03-2847-2002 disebutkan bahwa faktor harus diambil sebesar 0,85 untuk kuat tekan beton hingga atau sama dengan 30 MPa. Untuk kekuatan diatas 30 MPa, harus direduksi secara menerus sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan 7 MPa, tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,65.

Diatas telah disebutkan bahwa momen lentur luar yang terjadi harus dilawan oleh momen dalam yang disumbangkan oleh kekuatan penampangnya itu sendiri.

Besarnya momen lentur ultimate diatur dalam SNI 03-2847-2002 sebagai hasil kombinasi terfaktor dari momen lentur akibat beban mati (DL = dead load) dan beban hidup (LL + life load) serta pengaruh dari beban-beban lainnya yang harus ditinjau sesuai dengan strutur yang akan direncanakan serta kondisi alam yang ada. Adanya pemfaktoran terhadap beban-beban yang bekerja ini dilakukan sebab perencanaan kekuatan batas yang mengerahkan seluruh kekuatan penampang yang ada untuk menahan beban-beban yang bekerja, sehingga diperlukan adanya suatu pengaman terhadap ketidakpastian yang mungkin timbul dalam pembebanan akibat beban mati dan beban hidup yang dalam pasal 11.2 ayat 1 besarnya kombinasi yang harus diambil adalah :

$$M_u = 1,2M_{DL} + 1,6M_{LL} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.12$$

Momen dalam yang harus dimiliki oleh penampang untuk menahan momen luar ultimate yang terjadi dinyatakan istilah momen nominal , M Hubungan antara M dengan M adalah sebagai berikut :

$$\phi M_n \geq M_u \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.13$$

Adalah faktor reduksi kekuatan untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan kekuatan nominal aktual yang ada dibandingkan dengan kekuatan nominal yang direncanakan. Hal ini mungkin saja dapat terjadi karena pelaksanaan pecampuran material yang tidak sesuai spesifikasi, Pelaksaan pengecoran yang kurang baik, maupun hal-hal praktis lainnya yang berkaitan dengan pelaksanaan di lapangan. Untuk perencanaan kekuatan terhadap lentur, besarnya harus diambil sebesar 0.8 sesuai dengan pasal 11.3 ayat 2 butir 1 SNI 03-2847-2002.

Ketika harga momen nominal sudah didapatkan, maka dapat dihitung banyaknya pembesian yang dibutuhkan untuk penampang yang bersangkutan. Besarnya pembesian dinyatakan dalam A_s yang menyatakan luas total pembesian yang diperlukan. Hingga A_s dapat dicari dengan menerapkan prinsip keseimbangan gaya-gaya horizontal ($\Sigma H = 0$) dan keseimbangan momen ($\Sigma M = 0$) pada penampang.

Dari syarat keseimbangan $\Sigma H = 0$ diperoleh :

$$C_c = T_s$$

$$0,85.f_c'.a.b = A_s.f_y$$

$$a = \frac{A_s.f_y}{0,85.f_c'.b} \quad \text{.....} \quad 2.14$$

Dengan mengambil ΣM = 0 pada titk tempat bekerjanya pusat gaya tekan beton C_c , diperoleh :

$$M = T\ (d - (1/2)\ a)$$

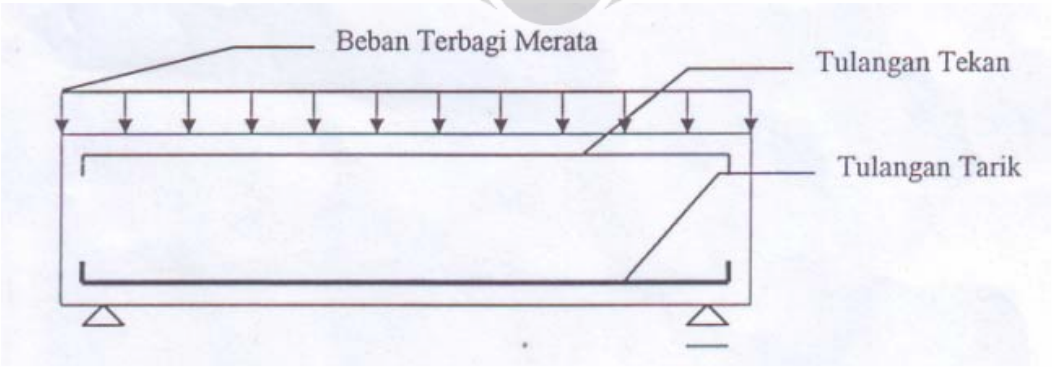
$$M = A.f\ (d - (1/2)\ a) \quad \text{.....} \quad 2.15$$

Substitusi persamaan 2,3 ke dalam persamaan II menghasilkan

$$M_n = A_s.f_y\left[d - \frac{A_s.f_y}{1,7.f_c'.b}\right] \quad \text{.....} \quad 2.16$$

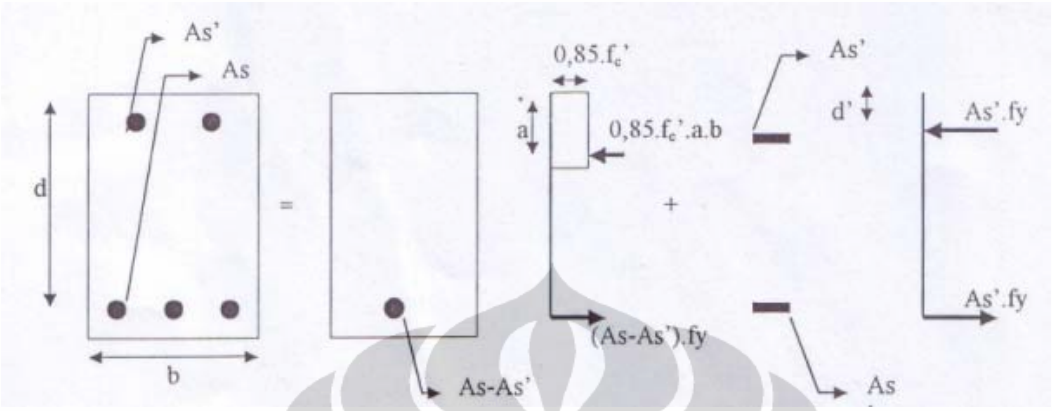
Persamaan 2.16 adalah persamaan kuadrat dalam variable A_s , yang dengan menyelesaikan akar-akarnya dapat dicari besarnya A_s yang dibutuhkan oleh suatu penampang sesuai dengan dimensi penampang dan besarnya beban yang bekerja pada struktur.

Dalam perencanaan kekuatan stuktur balok segi empat terhadap lentur yang menggunakan pemasangan tulangan rangkap pada prinsipnya sama dengan balok yang menggunakan penulangan tunggal, yaitu dengan menerapkan prinsip keseimbangan gaya dan momen yang terjadi dalam penampang, hanya saja tetap dibutuhkan beberapa penyesuaian sehubungan dengan terpasangnya tulangan pada daerah tekan sebagai berikut :



Gambar 2.6 Balok dengan Penulangan Tekan

Untuk melihat pengaruh pemasangan tulangan tekan pada penampang diberikan skema tegangan tekan dan tarik yang terjadi dalam penampang pada gambar 2.7 berikut ini :



(a) (b)

Gambar 2.7 Diagram Balok dengan Penulangan Rangkap

Gambar diagram tegangan di atas memudahkan penghitungan momen nominal yang ada pada penampang dengan tulangan rangkap. Momen nominal total dari penampang adalah jumlah momen nominal yang didapatkan dari gambar 2.7.a dan 2.7.b Momen nominal yang diperoleh dari gambar 2.7.b dinamakan M_{n2}.

Dengan analogi yang sama pada penghitungan momen nominal untuk balok dengan penulangan tunggal yaitu jumlah momen sama dengan nol (∑M = 0) pada titik tempat garis kerja dari gaya tekan beton, dapat ditentukan M_{n1} yaitu :

$$M_{nl} = (A_s - A'_s).f_y.\left[d\frac{(A_s - A'_s.f_y}{1,7.f'_c.b}\right] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.17$$

Besarnya M_{n2} dapat dicari dengan melihat gambar 2.7.b dan menerapkan prinsip ∑M = 0 pada titik tempat bekerjanya garis kerja gaya tekan dari tulangan tekan sehingga diperoleh :

$$M_{n2} = A'_s.f_y(d - d') \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.18$$

Dengan menjumlahkan persamaan 2.17 dan persamaan 2.18 akan diperoleh momen nominal total yang dimiliki oleh penampang bertulangan rangkap. Jika penjumlahan ini dilakukan, maka akan diperoleh suatu persamaan baru yang memuat A_s dan A_s' sebagai variable yang tidak diketahui. Pada prakteknya, pemasangan tulangan tekan berkisar antara 0,4 sampai dengan 0,8 dari tulangan

tariknya. Dengan menetapkan suatu faktor baru, yaitu δ, yang didefinisikan sebagai rasio antara tulangan tekan dengan tulangan tarik, maka persamaan baru hasil penjumlahan persamaan 2.17 dan 2.18 hanya akan berisi satu variable bebas yaitu A_s, dan hal ini dapat terjadi hanya jika harga δ ditentukan terlebih dahulu dengan harga berkisar antara 0,4 sampai dengan 0,8.

$$\delta = \frac{A_s'}{A_s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.19$$

Penjumlahan persamaan 2.6 dan 2.7 menghasilkan :

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

$$M_n = (1-\delta)A_s.f_y.\left[d\frac{(1-\delta)A_s.f_y}{1,7.f'_c.b}\right] + \delta.A_s.f_y.(d-d') \quad \ldots.. \quad 2.20$$

Persamaan 2.9 adalah persamaan kuadrat dengan satu variable, yaitu A_s, sehingga dengan menyelesaikan akar-akarnya dapat dicari besarnya tulangan tarik yang diperlukan sesuai dengan dimensi penampang, kondisi pembebanan yang ada, dan besarnya rasio tulangan tekan dengan tulangan pun dapat dicari dengan memanfaatkan hubungan antara tulangan tekan dan tulangan tarik yang didefinisikan dalam δ.

2.2.1.2 Perencanaan Kekuatan Struktur Terhadap Geser

Pasal 13.1.1 SNI 03-2847-2002 menetapkan bahwa gaya lintang yang bekerja pada penampang yang ditinjau harus direncanakan sedemikian rupa sehingga :

$$\phi V_n \geq V_u \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.21$$

Sama seperti dalam perencanaan lentur, dalam perencanaan kekuatan struktur terhadap geser pun dikenal istilah geser *ultimate* dan geser nominal yang hubungan antara keduanya ditulis dalam persamaan 2.21. Dalam perencanaan kekuatan struktur terhadap geser, maka besarnya faktor reduksi kekuatan ϕ diambil sebesar 0,6 sesuai dengan pasal 11.3 ayat 2 butir 3 SNI 03-2847-2002. Faktor reduksi kekuatan ini menyebabkan hanya 60% dari kekuatan nominal penampang yang diperhitungkan dalam menahan tegangan geser yang bekerja, sedangkan dalam perencanaan lentur diambil 80% dari kekuatan nominal penampang yang diperhitungkan dalam menahan tegangan lentur yang bekerja.

Hal ini terjadi mengingat tipe keruntuhan struktur beton yang dominan disebabkan oleh geser adalah tipe keruntuhan yang tidak daktail alias termasuk tipe keruntuhan yang getas. Tipe keruntuhan yang getas ini sedapat mungkin dihindari dengan memberikan faktor keamanan pada struktur yang lebih besar dalam bentuk koefisien reduksi kekuatan penampang yang lebih kecil, sebab tipe keruntuhan getas tidak disertai dengan adanya gejala yang dapat menjadi peringatan bagi pemakai bangunan berupa deformasi yang besar sebelum runtuh. Peringatan yang baik melalui deformasi yang besar sebelum struktur mencapai keruntuhannya jelas merupakan pertimbangan yang penting dalam perencanaan.

Dalam skripsi ini perhitungan gaya geser *ultimate* didasarkan pada kombinasi antara gaya geser yang diakibatkan oleh beban mati dan gaya geser yang diakibatkan oleh beban hidup dengan hubungan sebagai berikut :

$$V_u = 1,2V_{DL} + 1,6V_{LL} \quad \text{.....} \quad 2.22$$

Kuat geser nominal penampang beton dipahami sebagai kombinasi antara kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton V_c dan kuat geser nominal yang disumbangkan oleh tulangan geser V_s dengan hubungan sebagai berikut :

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{.....} \quad 2.23$$

Pasal 13 SNI 03-2847-2002 mencantumkan batasan-batasan dalam perencanaan kekuatan penampang terhadap geser. Beberapa di antaranya yang berkaitan dengan perencanaan kekuatan penampang terhadap geser yang akan dimodelkan dalam skripsi ini adalah :

- Besarnya V_u boleh direncanakan pada titik sejarak d dari tumpuan
- Besarnya gaya geser sumbangan beton V_c adalah :

  $$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}.b_w.d \quad \text{.....} \quad 2.24$$

  jika $V_n < 0,5\ V_c$ maka tidak diperlukan penulangan geser
- Jika $0,5\ V_c < V_n < V_c$ maka pada penampang diperlukan penulangan geser minimum dengan jarak sengkang s :

  $$s = \frac{3.A_v.f_y}{b_w} \quad \text{.....} \quad 2.25$$

  dan A_v adalah luas tulangan geser padapenampang yang dirumuskan sebagai :

  $$A_v = n.0,25.\pi.D^2 \quad \text{.....} \quad 2.26$$

Dengan n adalah jumlah kaki sengkang, untuk sengkang berkaki dua maka n=2 dan untuk sengkang berkaki tiga maka n=3.

Gambar 2.8 Skema Jumlah Kaki Sengkang

- Jarak antar sengkang minimum : s_{min} = 100 mm
- Jika $V_n \geq V_c$ maka diperlukan penulangan geser, di mana gaya geser yang harus ditahan oleh tulangan sesuai dengan persamaan 2.23 dengan jarak sengkang s :

$$s = \frac{A_v.f_y.d}{V_s} \quad \text{.....} \quad 2.27$$

- Pembatasan jarak sengkang :
  - untuk $V_s \leq \frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}}.b_w.d$ maka s_{max} adalah yang terkecil dari d/2 atau 600 mm
  - untuk $\frac{1}{3}\sqrt{f_c^{'}}.b_w.d < V_s < \frac{2}{3}\sqrt{f_c^{'}}.b_w.d$ maka s_{max} adalah yang terkecil dari d/4 atau 300 mm
  - untuk $V_s > \frac{2}{3}\sqrt{f_c^{'}}.b_w.d$ diperlukan perubahan penampang beton

2.2.2 Pemeriksaan Daktilitas Struktur

Perencanaan penampang struktur balok dalam kondisi *ultimate* didasarkan pada suatu asumsi bahwa tipe keruntuhan yang dapat terjadi pada struktur adalah tipe keruntuhan yang daktil (*dactile failure)* yang menjamin adanya tanda-tanda peringatan dini bagi pengguna bangunan ketika proses keruntuhan sedang terjadi.

Peringatan dini ini diharapkan muncul dalam bentuk terjadinya deformasi yang besar pada struktur sebelum terjadinya keruntuhan.

Satu hal penting dalam masalah keruntuhan adalah apabila baja tulangan tidak melampaui batas regangan leleh pada saat struktur akan mengalami keruntuhan, maka keruntuhan pada struktur itu akan ditentukan oleh tercapainya regangan *ultimate* beton. Jika hal ini terjadi, maka akan timbul keruntuhan yang getas (keruntuhan secara mendadak = *brittle failure*) tanpa peringatan yang cukup bagi pengguna bangunan. Tipe keruntuhan semacam ini sudah sepatutnya dihindari.

Dari deskripsi di atas dapat disimpulkan bahwa perencanaan pembesian pada penampang tidak cukup hanya dengan mengandalkan perhitungan kekuatannya saja, melainkan juga harus mempertimbangkan tingkat daktilitas struktur sesuai dengan pembesian yang dipasang. SNI 03-2847-2002 memahami hal ini dengan memperkenalkan suatu parameter, ρ, yang merupakan rasio antara tulangan yang terpasang dengan luas penampang bruto sebagai pedoman pembatasan jumlah tulangan. Adanya pembatasan jumlah tulangan maksimum dan minimum mutlak diperlukan demi tercapainya daktilitas struktur.

Dalam pasal 12.5 SNI 03-2847-2002 disebutkan bahwa untuk perencanaan kekuatan komponen struktur terhadap lentur ada harga minimum pembesian yang dinyatakan dengan :

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.28$$

Adanya penetapan pembesian minimum ini lahir dari suatu pemahaman bahwa besarnya regangan baja tulangan seharusnya sama atau mendekati dengan regangan beton di sekitarnya, sebab apabila regangan baja menjadi jauh lebih besar dibandingkan dengan regangan beton di sekitarnya akibat pembesian yang terlalu sedikit, akan menyebabkan terjadinya retak. Retak yang terjadi dalam suatu penampang akan mengakibatkan pertambahan tegangan yang tiba-tiba pada baja tulangan yang dapat mengakibatkan putusnya baja tulangan secara mendadak. Jadi pembesian minimum ini dipilih sedemikian rupa sehingga terdapat perbedaan yang kecil antara momen lentur yang dapat ditahan oleh penampang yang tak retak dan momen lentur yang dapat ditahan oleh penampang yang retak.

Pembatasan banyaknya pembesian lentur maksimum diatur dalam SNI 03-2847-2002 pasal 12.3. ayat 3 yng menyatakan bahwa ρ yang ada tidak boleh melampaui 0,75 dari ρ_b yang menghasilkan kondisi regangan berimbang untuk penampang yang mengalami lentur tanpa beban aksial, yang secara matematis dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho_{max}=0,75.\ \rho_b \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.29$$

Besar rasio tulangan pada kondisi regangan berimbang (ρ_b) dapat diturunkan dari distribusi regangan pada saat beton mencapai regangan tekan *ultimate*-nya sebesar 0,003 dan tulangan mencapai regangan leleh yang bersesuaian dengan tegangan lelehnya, yaitu :

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.30$$

Dari gambar 2.2, pada bagian distribusi regangan, dengan mengansumsikan bahwa tulangan yang dipasang memiliki harga Modelus E_s = 200000 MPa, dapat ditentukan rasio x/d sebagai berikut :

$$\frac{x}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \dfrac{f_y}{200000}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.31$$

Dengan memperhatikan distribusi tegangan gambar 2.2 dan menerapkan prinsip ∑H = 0 akan diperoleh :

$A_s.f_y = 0,85.f_c^{'}.\beta_1.x.d$; dengan membagi kedua ruas dengan (b.d) dan mensubstitusikan persamaan 2.20 untuk mengganti x/d yang muncul setelah pembagian serta mengaplikasikan prinsip bahwa rasio antara tulangan dengan luas penampang bruto pada kondisi berimbang adalah ρ_b, maka didapat :

$$\rho_b = \frac{0,85.f_c^{'}.\beta_1}{f_y}\left[\frac{600}{600 + f_y}\right] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.32$$

Untuk balok-balok yang menggunakan pembesian rangkap dengan menggunakan tulangan tekan, maka syarat pembesian maksimumnya menjadi : rasio tulangan tarik maksimum terhadap luas bruto dikurangi dengan rasio tulangan tekan terhadap luas bruto (ρ') harus sama dengan 0,75 kali ρ_b, yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho_{max}=0,75.\ \rho_b + \rho' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.33$$

2.2.3 Pemeriksaan Kekakuan Struktur dengan Analisis Defleksi

Pemeriksaan kekakuan struktur yang dipresentasikan dengan melakukan analisa defleksi ini dilakukan untuk menjamin tercapainya syarat kemampulayanan struktur. Struktur yang kuat dalam menahan beban-beban rencana belum tentu menunjukkan *performance* yang baik dalam hal kekakuan, yang dapat terjadi dalam bentuk struktur yang mengalami defleksi yang relatif besar meskipun struktur masih dalam keadaan kuat dan tidak mengalami keruntuhan. Dalam kasus-kasus tertentu, di mana defleksi yang besar tidak diinginkan untuk terjadi agar tercapai kondisi layan yang memadai, maka batasan perencanaan kekuatan struktur juga harus memperhatikan aspek kekakuannya. Pada struktur balok beton bertulang yang digunakan untuk menahan dinding dan komponen arsitektural *(finishing)*, defleksi besar yang terjadi pada struktur balok akan menimbulkan retak pada dinding dan disfungsi pada komponen arsitektural yang tentu saja sangat merugikan.

Pada struktur balok beton bertulang terjadinya retak adalah hal yang wajar, dan hal ini menimbulkan kesulitan dalam perhitungan lendutan secara teliti, sebab penampang balok beton bertulang yang mengalami retak akan mempunyai momen inersia penampang yang lebih kecil daripada penampang balok beton bertulang yang belum mengalami retak, sedangkan harga momen inersia sangat berpengaruh dalam perhitungan lendutan. Hal ini diakomodir dalam SNI 03-2847-2002 dengan memberikan harga Modelus retak penampang beton bertulang sebesar :

$$f_r = 0,7\sqrt{f_c^{'}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.34$$

yang dapat digunakan untuk mencari harga, yaitu momen pertama yang menyebabkan penampang retak dan memberikan perumusan momen inersia efektif sebesar :

$$I_e = \left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3 .I_g + \left[1 - \left[\frac{M_{cr}}{M_a}\right]^3\right] I_{cr} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.35$$

Perhitungan defleksi pada struktur balok beton bertulang ini dilakukan dengan metode beban kerja *(working load method)* berdasarkan aturan dan sistematika perhitungan lendutan/defleksi yang diatur dalam pasal 11.5 SNI 03-2847-2002. Kontrol terhadap lendutan izin maksimum yang boleh terjadi mengacu pada tabel 9 dalam peraturan yang sama. Dalam perhitungan lendutan ini juga diperiksa penambahan lendutan jangka panjang struktur balok beton bertulang akibat fenomena rangkak *(creep)* dan susut *(shringkage)* yang dihitung dengan mengalikan lendutan akibat beban tetap yang ditinjau dengan faktor :

$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.36$$

Di mana besarnya ξ tergantung dari tinjauan durasi pembebanan tetap yang bekerja dan menggunakan koefisien yang telah diatur dalam peraturan.

2.2.4 Pemeriksaan Pembatasan Retak

Meskipun terjadinya retak pada komponen struktur beton bertulang adalah hal yang wajar, besarnya retak yang terjadi tetap harus dicermati dan dibatasi. Pembatasan retak ini perlu ditinjau mengingat retak yang terjadi dapat menimbulkan korosi pada regangan dan tegangan yang tentu saja bersesuaian dengan besarnya retak yang terjadi.

Pasal 12.6 SNI 03-2847-2002 tentang distribusi tulangan lentur pada balok dan pelat satu arah memberikan batasan tertentu (berupa nilai z) untuk menerjemahkan pembatasan retak dalam perhitungan yang lebih mudah. Ayat 4 dalam pasal ini menyebutkan bahwa bila tegangan lelah rencana f_y untuk tulangan tarik melebihi 300 Mpa, penampang dengan momen positif dan negatif maksimum harus diproporsikan sedemikian sehingga nilai z yang diberikan oleh :

$$z = f_s \sqrt[3]{d_c.A} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.37$$

Tidak melebihi 30 MN/m untuk penampang di dalam ruangan dan 25 MN/m untuk penampang yang dipengaruhi cuaca luar. Tegangan terhitung dalam tulangan untuk kondisi beban kerja, f_s, harus dihitung sebagai momen dibagi oleh hasil kali luas baja dengan lengan momen dalam. Bila tidak ditinjau dengan cara di atas, f_s boleh diambil sebesar 60 % dari kuat leleh yang ditentukan, f_y. Nilai A adalah luasan penampang potongan tarik efektif yang berada di sekeliling

tulangan, di mana letak tulangan adalah sentris terhadap penampang tersebut, sedangkan nilai d_c adalah jarak antara titik berat tulangan utama sampai serat tarik terluar.

2.3 Desain dan Pemeriksaan Struktur Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan

2.3.1 Perencanaan Kekuatan Struktur

Untuk struktur yang direncanakan untuk mengalami perkuatan akibat adanya penambahan beban yang bekerja, dasar teori perhitungan perencanaan kekuatan struktur secara identik sama dengan struktur yang belum mengalami perkuatan, hanya saja dalam melakukan perencanaan kekuatan terhadap lentur dilakukan dalam dua tahap, yaitu perencanaan menggunakan *serviceability method* dan *ultimate method.*

Perencanaan dengan *serviceability method* dilakukan untuk melihat kondisi regangan dan distribusi tegangan yang terjadi dalam kondisi beban kerja. Tegangan-tegangan yang terjadi dibandingkan dengan besarnya tegangan izin. Untuk struktur yang diperkuat atau sudah tidak lagi dalam kondisi normal, dapat diizinkan terlampauinya tegangan izin. Besarnya kerja *(working stress)* yang terjadi ini menjadi menjadi dasar pertimbangan dalam melakukan perencanaan kekuatan menggunakan *ultimate method.* Jika dari pemeriksaan distribusi regangan dan tegangan dalam kondisi *ultimate* diketahui bahwa regangan batas beton sebesar 0,003 belum tercapai ketika material perkuatan telah mencapai regangan batasnya, maka untuk memeriksa besarnya momen nominal penampang dalam kondisi *ultimate* didasarkan pada distribusi regangan dan tegangan dalam teori *rheologis* beton yang ditulis oleh DR. Ir. F.X. Supartono.

2.3.2 Pemeriksaan Daktilitas Struktur

Pemeriksaaan daktilitas struktur difokuskan pada pemeriksaan mengenai terdapat tidaknya kondisi *over reinforced* yang mungkin saja terjadi akibat ditambahkannya elemen perkuatan lentur yang dalam hal ini berupa pelat karbon pada balok beton bertulang yang mengalami perkuatan. Kondisi *over reinforced* ini adalah kondisi yang dapat menimbulkan kondisi regangan berimbang, sebab

keruntuhan penampang yang *over reinforced* adalah keruntuhan yang dikontrol oleh keruntuhan material beton, sebab untuk kondisi *over reinforced*, material beton akan lebih dahulu mencapai regangan tekan *ultimate* sebelum material perkuatan mengalami regangan tarik *ultimate.*

Jika setelah diadakan pemeriksaan distrbusi regangan dapat disimpulkan bahwa struktur berada dalam kondisi *over reinforced*, maka dilakukan antisipasi dengan menggunakan nilai faktor reduksi kekuatan ϕ yang lebih kecil daripada faktor reduksi kekuatan yang digunakan pada penampang yang didesain dengan kondisi keruntuhan berimbang. Dengan demikian, pada kondisi *over reinforced,* dengan mempertimbangkan kondisi keruntuhan yang *brittle*, diambil suatu pendekatan faktor keamanan dengan mengambil kekuatan penampang yang lebih kecil dalam menahan beban-beban yang ada.

2.3.3 Pemeriksaan Kekakuan Struktur dengan Analisis Defleksi

Analisis defleksi pada struktur yang diperkuat dengan struktur yang belum mengalami perkuatan. Besarnya lendutan / defleksi maksimum yang boleh terjadi menggunakan batasan yang sama pula, yaitu yang tercantum dalam tabel 9 SNI 03-2847-2002.

Struktur yang direncanakan mengalami penambahan beban rencana diharapkan memiliki besar lendutan yang masih berada dalam batasan lendutan izin maksimum.

2.3.4 Pemeriksaan Pembatasan Retak

Dasar teori dan aturan untuk membatasi besarnya retak yang terjadi juga identik dengan struktur biasa yang belum mengalami perkuatan. Untuk mencari besarnya tegangan tarik yang bekerja dalam pelat karbon (*Sika Carbodur Plates),* yang diperlukan dalam perhitungan pembatasan retak, dibuat diagram distribusi regangan yang bersesuaian dengan besarnya regangan yang terjadi.

2.4 Teori Kerusakan dan Perbaikan Beton

Kerusakan pada suatu material adalah sesuatu yang mengkin terjadi bahkan sering terjadi, termasuk pada stuktur beton bertulang. Kerusakan yang

terjadi dapat berupa kerusakan yang ringan sampai dengan berupa kerusakan yang berat seperti halnya keruntuham pada struktur tersebut

2.4.1 Kerusakan beton bertulang

Kerusakan pada struktur balok beton bertulang dapat diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya dapat berasal dari pengaruh fisika, kimia dan juga mekanis.

a. Kerusakan akibat pengaruh fisika

   Kerusakan ini terjadi akibat adanya kejadian-kejadian fisis seperti halnya kebakaran atau panas hidrasi

b. Kerusakan akibat pengaruh kimia

   Kerusakan beton akibat pengaruh kimia mungkin terjadi karena adanya kontak antara permukaan beton dengan zat kimia. Zat kimia yang bersentuhan langsung dengan permukaan beton tentu akan mempengaruhi kondisi struktur. Kejadian tersebut sering dijumpai pada beton pondasi, lantai dasar gedung, pipa selokan, dermaga, bak limbah, dan lokasi lainnya.

   Contoh kerusakan yang ditimbulkan antara lain korosi pada tulangan beton, korosi oksidasi langsung, korosi elektrokimia, asam ammonia, dan lain sebagainya.

c. Kerusakan akibat pengaruh mekanis

   Kerusakan beton bertulang akibat pengaruh mekanis, yaitu kerusakan disebabkan oleh faktor-faktor mekanis yang berasal dari luar struktur tersebut, baik secara langsung maupun tak langsung.

Beberapa contoh penyebab kerusakan jenis ini antara lain :

- Karena tumbukan dan sejenisnya, misalnya karena ditabrak oleh benda berat.
- Pembebanan yang berlebihan (*overload*). Pada hakekatnya setiap struktur yang dibangun telah didesain sebelumnya, termasuk terhadap daya layan struktur tersebut. Meskipun *safety factor* telah diterapkan ketika mendesain, ketidakdisiplinan manusia terkadang dalam menggunakan struktur tesebut melebihi kapasitas struktur tersebut.

- Pengikisan permukaan, umumnya terjadi pada struktur beton di lingkungan air, misalnya pier jembatan atau balok dermaga. Pengikisan disebabkan oleh aliran air yang menghantam struktur secara terus-menerus. Awalnya pengikisan oleh aliran air ini hanya akan merusak lapisan terluar dari struktur beton, namun apabila tidak segera diantisipasi, kerusakan akan merambat ke bagian dalam.
- Akibat lainnya : Ledakan, gempa bumi

Kerusakan yang terjadi oleh hal-hal di atas bervariasi, perbaikan yang dilakukan terhadap struktur beton pun bervariasi, dari kerusakan ringan non-struktural pada permukaan beton seperti goresan, retak rambut, sampai dengan kerusakan berat berupa kehancuran struktur, misalnya akibat ledakan, atau gempa bumi

Untuk kerusakan struktural, harus segera dilakukan tindakan perbaikan, untuk dapat tetap mempertahankan kinerja dari struktur beton tersebut.

2.4.2 Perbaikan beton bertulang

2.4.2.1 Syarat bahan perbaikan

Dalam usaha perbaikan beton, haruslah memperhatikan material yang digunakan. Terdapat syarat-syarat yang harus dimiliki material pebaikan tersebut. Kriteria material yang digunakan sebagai material perbaikan tentunya harus memiliki karakteristik dasar seperti bahan yang akan diperbaiki, dalam hal ini beton. Selain memiliki karakteristik dasar seperti beton dalam hal kekuatan khususnya, ada beberapa sifat beton yang harus dieliminir sedemikian rupa atau bahkan dihilangkan, agar bahan perbaikan tersebut dapat menempel dan menyatu dengan beton eksis tanpa mengurangi performa beton eksis.

Secara umum, syarat bahan perbaikan untuk struktur beton adalah sebagai berikut:

- Memiliki nilai *workability* yang tinggi
- Memiliki daya lekat yang baik dengan beton dan baja tulangan eksis
- Memiliki nilai karakteristik yang sama atau lebih kuat dari beton eksis; *compressive, flexural, tensile strength*
- Memiliki waktu ikat yang relatif singkat
- Tidak mengalami penyusutan

Jenis bahan perbaikan beton yang umum digunakan antara lain :

- Mortar semen
- *Epoxy resin*
- *Grout*

2.4.2.2 Metode perbaikan

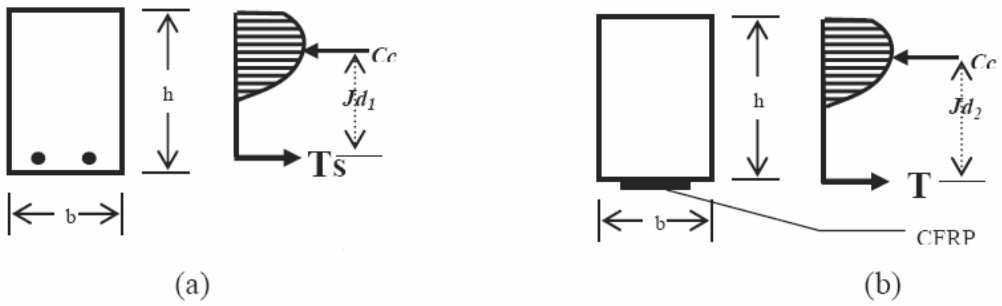
Terdapat beberapa metode yang umum digunakan dalam perbaikan beton. Metode perbaikan yang digunakan berbeda-beda untuk setiap kasus, disesuaikan dengan kondisi kerusakan dan ketersediaan peralatan yang ada.

Metode perbaikan beton antara lain :

- Penambahan atau pembentukan kembali, digunakan apabila kerusakan yang terjadi termasuk jenis kerusakan ringan dan non-struktural, dan terletak pada sisi permukaan beton, misalnya perbaikan untuk retak rambut yang terdapat di permukaan beton.
- Penyuntikan *(shotcrete* dan *injection),* digunakan apabila kerusakan yang terjadi berupa struktural dan terletak di bagian dalam, atau berupa celah.

2.5 Studi Bahan Eksternal

Besarnya kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja tarik di dalam beton (jarak *Jd*). Semakin besar jarak *Jd* maka kapasitas momen (*M*) yang terjadi makin besar pula. Agar kapasitas momen balok dapat bekerja optimal maka tulangan harus diletakkan di serat tarik balok yang paling jauh, dengan kata lain nilai *Jd* diupayakan maksimum, dimana $Jd_2 > Jd_1$ sehingga $M_2 > M_1$ seperti terlihat pada gambar 2.9. Namun demikian hal tersebut menjadikan tidak tersedianya lekatan yang cukup antara tulangan baja dan beton, sehingga aksi komposit yang diharapkan tidak dapat terjadi secara sempurna.



Gambar 2.9 (a) Penampang Tulangan Baja dan (b) Plat CFRP pada Balok

Apabila balok beton dipasang CFRP maka kuat lentur balok yang terjadi adalah seperti gambar 2.10,

Berdasarkan gambar 2.10,

T_F = Gaya tarik CFRP

Jd = Jarak dari gaya tekan beton sampai gaya tarik baja

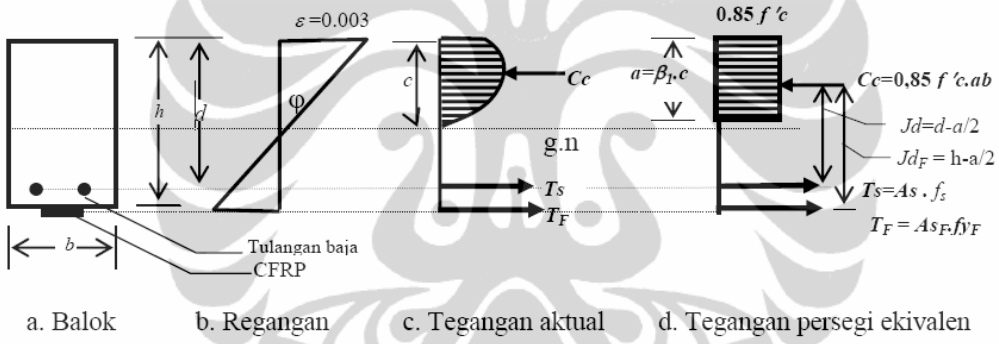
Jd_F = Jarak dari gaya tekan beton sampai gaya tarik CFRP

Selanjutnya,

$$Cc = 0,85.f'c.a.b \quad \text{.....} \quad 2.38$$

$$Ts = As.f_s \quad \text{.....} \quad 2.39$$

$$T_F = As_F.fy_F \quad \text{.....} \quad 2.40$$



Gambar 2.10 Distribusi Tegangan dan Regangan Beton dengan CFRP

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam penampang balok beton dengan perkuatan CFRP :

$$Cs = Ts + T_F \quad \text{.....} \quad 2.41$$

Diperoleh momen :

$$M = As.f_s.Jd + As_F.fy_F.Jd_F \quad \text{.....} \quad 2.42$$

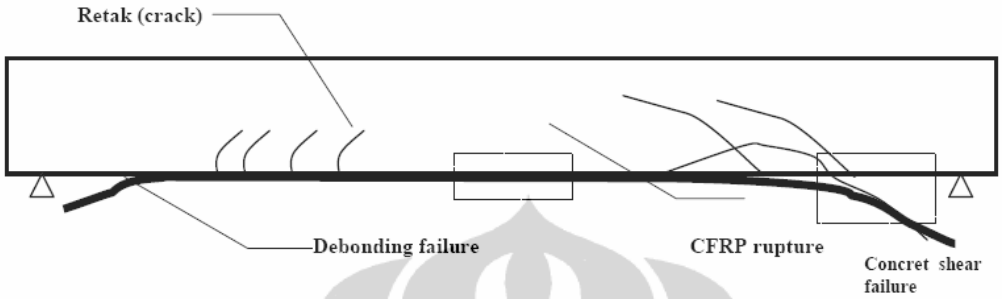
Penambahan suku yang berasal dari komponen CFRP pada persamaan 2.42 di atas menunjukkan adanya peningkatan kapasitas lentur penampang.

Pola keruntuhan pada struktur balok yang diberi CFRP dibedakan menjadi tiga jenis (gambar 2.11), yaitu :

1. Keruntuhan geser
2. Debonding failure

3. Keruntuhan pada CFRP

Dari ketiga jenis keruntuhan tersebut maka yang dikehendaki adalah keruntuhan pada CFRP terlebih dahulu (CFRP rupture), karena dengan demikian seluruh kekuatan CFRP dapat bekerja secara optimal.



Gambar 2.11 Mekanisme Keruntuhan Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan CFRP (Kuriger, 2001)

2.5.1 *Carbon Fibre Reinforced Plate* (CFRP)

CFRP merupakan bahan type *Sika Carbodur* S512 dengan lebar 50 mm, tebal 1,2 mm dan mempunyai luas tampang 60 mm^2. Data teknis tentang *Sika Carbodur* dapat dilihat pada tabel 2.2,

Tabel 2.2 Karakteristik CFRP

Properties	CFRP (Carbodur S512)
Kuat tarik	2800 MPa
Modelus Elastisitas	165.000 MPa
E_{cu}	> 1,7 %
Tebal/ lebar	1,2 mm/ 50 mm
Berat isi	1,60 g/cm^3

Sumber : PT Sika Indonesia

2.5.2 *Epoxy* (Perekat)

Penggunaan CFRP sebagai tulangan ekternal pada struktur kantilever beton memerlukan bahan Pengikat agar diperoleh aksi komposit antara beton dan CFRP. Data teknis tentang *epoxy adhesives* merupakan data sekunder dari PT Sika Indonesia selaku produsen. Spesifikasi data teknis *epoxy* yang dipakai dapat dilihat pada tabel 2.3,

Tabel 2.3 Karakteristik *Epoxy*

Properties	*Epoxy* jenis Sikadur 30
Modelus Elastisitas	12.800 Mpa
Kuat lekat pada beton	> 4 MPa

Sumber : PT Sika Indonesia