BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton merupakan campuran antara semen *portland*, agregat, air, dan terkadang ditambahi dengan variasi bahan tambah mulai dari bahan tambah kimia sampai dengan bahan tambah non – kimia pada perbandingan tertentu (Tjokrodimuljo, 1992). Kekuatan beton bergantung pada proporsi campuran, kualitas bahan dasar penyusun beton (air, semen, agregat kasar, agregat halus, dan bahan tambah), cara menakar dan mencampur, kelembaban di sekitar beton, dan metode perawatan (Murdock, L.J dkk, 1986). Agar kekuatan beton yang dihasilkan sesuai dengan rencana maka perlu dibuat rencana adukan beton atau *mix design* yang berguna untuk memperoleh kebutuhan semen, pasir, kerikil, dan air.

Beton memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan beton diantaranya dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan, mampu memikul beban yang berat, tahan terhadap suhu tinggi, dan bianya pemeliharaan yang relatif murah sedangkan kekurangan beton adalah sulit merubah bentuk yang telah dibuat, berat, pengerjaan membutuhkan ketelitian tinggi, daya pantul suara yang besar, dan kuat tarik yang rendah. Kuat tarik beton yang lemah dapat diatasi dengan menambahkan baja tulangan ke dalam beton yang selanjutnya disebut sebagai beton bertulang.

Baja tulangan dan beton bekerjasama dalam memikul beban yang terjadi, di mana beton akan menahan gaya tekan sedangkan baja tulangan akan menahan gaya tarik dan sebagian gaya tekan.

Material penuyusun beton seperti yang telah disebutkan di atas memiliki fungsi dan peranan masing – masing dalam menentukan kualitas beton yang dihasilkan. Adapun bahan penyusun beton sebagai berikut.

3.1.1 Air

Air adalah salah satu bahan yang paling penting dalam pembuatan dan perawatan beton (Tjokrodimuljo, 1996), yaitu untuk bereaksi dengan semen, karena tanpa air semen tidak dapat bereaksi untuk mengeras, selain itu air merupakan bahan yang paling mudah ditemukan dan harganya paling murah. Meskipun demikian, penambahan air perlu diperhatikan agar tidak terlalu berlebihan demi mencegah terjadinya *bleeding* yang dapat menyebabkan kekuatan beton berkurang.

Syarat – syarat air yang baik digunakan untuk campuran beton adalah air yang tidak berbau, tidak berkeruh, tidak mengandung minyak, asam, alkali, garam, dan bahan organik lainnya. Harap diperhatikan bahwa air yang berasal dari sumber alam tanpa pengolahan sering mengandung garam – garam anorganik, zat organik, dan zat – zat yang mengandung lempung atau tanah liat, minyak dan kotoran lainnya yang berpengaruh buruk terhadap mutu dan sifat beton (Dipohusodo, 1994). Menurut Tjokrodimuljo (1992), pemakaian air dalam campuran beton sebaiknya memenuhi persyaratan sebagai berikut :

a. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
b. Tidak mengandung garam – garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
c. Tidak mengandung klorida lebih dari 0,5 gram/liter.

d. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Air untuk perawatan beton sebaiknya tidak menimbulkan noda atau endapan yang dapat merusak warna permukaan beton, umunya zat – zat yang terkandung dalam air yang dapat menimbulkan kotoran dan perubahan warna pada beton sehingga membuat beton tidak enak dipandang adalah besi dan zat organik.

3.1.2 Semen *Portland*

Semen *Portland* merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan *klinker* yang terdiri dari silikat – silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan *gips* sebagai bahan tambahan untuk mengatur awal ikatan semen (Tjokrodimuljo, 1996).

Unsur – unsur yang terkandung dalam semen saling berinteraksi satu sama lain membentuk serangkaian produk yang lebih kompleks selama proses peleburan. Unsur – unsur kimia yang terkandung dalam semen ditunjukan pada Tabel 3.1 berikut (Tjokrodimuljo, 1992).

Tabel 3.1 Susunan Unsur Semen Biasa

Oksida	**Persen (%)**
Kapur (CaO)	60 – 65
Silika (SiO_2)	17 – 25
Alumina (Al_2O_3)	3 – 8
Besi (Fe_2O_3)	0,5 – 6
Magnesia (MgO)	0,5 – 4
Sulfur (SO_3)	1 – 2
Soda / Potash ($Na_2O + K_2O$)	0,5 – 1

(Sumber : Tjokrodimuljo, 1992)

Menurut Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI, 1982) sesuai dengan tujuan pemakainannya, semen *portland* di Indonesia dibagi menjadi 5 jenis, yaitu :

a. Jenis I (*Normal Portlan Cement*)

   Semen *Portland* yang penggunaannya tidak memerlukan persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis – jenis lain, aplikasi semen ini adalah pada bangunan umum seperti rumah, gedung, jembatan, dan pasanganan batu / bata.

b. Jenis II (*Modified Portland Cement*)

   Semen *Portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang. Aplikasi penggunaan semen ini adalah untuk bangunan teba seperti pir, pilar, dinding penahan tanah, bendungan, dan dermaga.

c. Jenis III (*High Early Strenght Portland Cement*)

   Semen *Portland* yang dalam penggunaannya menuntut kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi. Aplikasi penggunaan semen ini pada pembuatan perbaikan bangunan beton yang harus segera digunakan seperti jalan raya, dan lapangan terbang.

d. Jenis IV (*Low Heat Portand Cement*)

   Semen *Portland* yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan panas hidrasi yang rendah. Jenis ini digunakan untuk bendungan.

e. Jenis V (*Sulface Resisting Portland Cement*)

Semen *Portland* yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat. Semen ini digunakan pada bangunan yang terletak pada lingkungan yang mengandung sulfat pekat, contoh aplikasinya pada bendungan dan pemecah gelombang.

3.1.3 Agregat

Agregat merupakan butiran material alami yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran mortar. Agregat menempati 60% - 70% dari volume adukan beton (Tjokrodimuljo, 2009). Agregat yang butir – butirnya lebih besar dari 4,80 mm disebut agregat kasar dan agregat yang butir – butirnya lebih kesil 4,80 mm disebut agregat agregat halus. Secara umum agregat kasar sering disebut kerikil, kricak, batu pecah atau split sedangkan agregat halus disebut pasir, baik berupa pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai atau tanah galian atau hasil dari pecahan batu (Tjokrodimuljo, 1992).

3.1.3.1 Agregat kasar

Agregat kasar adalah agregat dengan ukuran butir – butir besar, yaitu antara 5 mm samapi 40 mm atau tertahan saringan nomor 4 (Tjokrodimuljo, 1996). Kerikil sebagai hasil disintregasi batuan karena diambil langsung dari alam (sungai) maka mempunyai bentuk permukaan bulat yang tidak beraturan, rata, dan licin akibat gerakan – gerakan atau pengausan oleh air sehingga mengurangi daya lekat dengan butiran agregat itu sendiri. Sedangkan batu pecah yang diperoleh dari alat pemecah batu mempunyai bentuk permukaan yang tidak rata, tidak beraturan, bersudut

tajam, dan lebih kasar sehingga dapat menambah daya lekat antara mortar dengan butiran agregat tersebut. Dengan demikian dapat memperkecil segregasi dan mutu beton yang dihasilkan lebih baik.

Menurut SK SNI S – 04 – 1989 – F, syarat – syarat yang harus dipenuhi oleh agregat kasar adalah sebagai berikut :

1. Agregat kasar harus terdiri dari butir – butir yang keras dan tidak berpori. Kadar bagian yang lemah bisa diuji dengan goresan batang tembaga, maksimum 5%.

Tabel 3.2 Pengujian Kekerasan Agregat Kasar

Kelas dan Mutu Beton	**Kekerasan dengan Bejana Tekan *Rudeloff*, Bagian Hancur Menembus Ayakan 2 mm Maksimum %**		**Kekerasan dengan Bejana Geser *Los Angeles*, Bagian Hancur Menembus Ayakan 1,7 mm Maksimum %**
	Fraksi Butir 19 – 30 mm	**Fraksi Butir 9,5 – 19 mm**	
Bo dan mutu B1	22 – 30	24 – 32	40 – 50
Beton mutu K125, K175, dan K225	14 – 22	16 – 24	27 – 40
Mutu beton di atas K225 atau beton pratekan	Kurang dari 14	Kurang dari 16	Kurang dari 27

(Sumber : SK SNI S – 04 – 1989 – F)

2. Agregat kasar yang mengandung butir – butir pipih dan panjang hanya dapat dipakai apabila jumlah butir – butir pipih dan panjang tersebut tidak melampaui 20% dari jumlah agregat seluruhnya.
3. Butir – butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh – pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.

4. Sifat kekal apabila diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut:
    - Jika dipakai *Natrium Sulfat*, bagian yang hancur maksimal 12%.
    - Jika dipakai *Magnesium Sulfat*, bagian yang hancur maksimal 10%.
5. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat – zat yang merusak beton, seperti zat – zat reaktif alkali.
6. Agregat kasar tidak boleh mangandung lumpur lebih dari 1% yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 1% maka agregat kasar harus dicuci.
7. Agregat kasar harus terdiri dari butir – butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan, susunan besar butir mempunyai modulus kehalusan 6 – 7,1 dan harus memenuhi syarat – syarat sebagai berikut :
    - Sisa di atas ayakan 38 mm, harus 0% berat.
    - Sisa di atas ayakan 4,8 mm, harus berkisar antara 90% - 98% berat.
    - Selisih antara sisa – sisa komulatif di atas dua ayakan yang berurutan adalah maksimal 60% dan minimal 10% berat.
8. Besar butir agregat maksimum tidak boleh lebih dari $^1/_5$ jarak terkecil antara bidang – bidang samping dari cetakan $^1/_3$ dari tebal pelat atau $^3/_4$ dari jarak bersih minimum diantara batang – batang atau berkas – berkas tulangan.

3.1.3.2 Agregat halus

Agregat halus merupakan batuan yang mempunyai ukuran butir antara 0,15 – 5 mm atau lolos saringan nomor 4 (Tjokrodimuljo, 2009). Menurut Spesifikasi SK SNI S – 04 – 1989 – F, syarat – syarat yang harus dipenuhi oleh agregat halus adalah sebagai berikut :

1. Agregat halus harus terdiri dari butir tajam, keras dengan indeks kekerasan ± 2,2.
2. Butir – butir agregat halus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh – pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
3. Sifat kekal apabila diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut:
    - Jika dipakai *Natrium Sulfat*, bagian yang hancur maksimal 12%.
    - Jika dipakai *Magnesium Sulfat*, bagian yang hancur maksimal 10%.
4. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 5% maka agregat halus harus dicuci.
5. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan – bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari *Abrams – Harder*.
6. Susunan besar butir agregat halus harus memenuhi modulus kehalusan antara 1,5 – 3,8 dan harus terdiri dari butir – butir yang beraneka ragam

besarnya. Apabila diayak sesuai susunan ayakan yang ditentukan harus memenuhi ketentuan berikut:

- Sisa di atas ayakan 4,8 mm, harus maksimal 2% berat.
- Sisa di atas ayakan 1,2 mm, harus maksimal 10% berat.
- Sisa di atas ayakan 0,3 mm, harus maksimal 15% berat.

7. Beton dengan tingkat keawetan yang tinggi, reaksi pasir dengan alkali harus negatif.
8. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk – petunjuk dari lembaga pemeriksaan yang diakui.
9. Agregat halus yang digunakan untuk spesi plesteran harus memenuhi persyaratan di atas.

3.2 Baja

Baja adalah salah satu dari material yang cukup penting dalam dunia konstruksi. Menurut Oentoeng (1999) baja dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan kekuatan dan bahan penyusunnya serta berdasarkan kadar karbon di dalam baja. Berdasarnya kadar karbon, baja yang sering digunakan sebagai material konstruksi adalah *mild carbon*, yaitu baja yang mengandung karbon antara 0,15% - 0,29%.

Baja konstruksi adalah *alloy steels* (baja paduan), yang pada umumnya mengandung lebih dari 98% besi dan biasanya kurang dari 1% karbon. Sekalipun komposisi aktual kimiawi sangat bervariasi untuk sifat-sifat yang diinginkan, seperti kekuatannya dan tahanannya terhadap korosi. Baja juga dapat mengandung

elemen paduan lainnya, seperti *silicon*, *magnesium*, *sulfur*, *fosfor*, tembaga, krom, nikel, dalam berbagai jumlah (Spiegel dan Limbrunner, 1991).

Sifat-sifat baja yang penting dalam penggunaan konstruksi adalah kekuatannya yang tinggi dibandingkan terhadap setiap bahan lain yang tersedia, serta sifat keliatannya. Menurut Bowles (1985) keliatan (*ductility*) adalah kemampuan untuk berdeformasi secara nyata baik dalam tegangan maupun dalam kompresi sebelum terjadi kegagalan. Penambahan kadar karbon dalam baja akan menambah tegangan leleh baja tetapi akan mengurangi daktilitas baja.

Beberapa keuntungan baja menurut Spiegel dan Limbrunner (1991) adalah keseragaman bahan, kestabilan dimensional, kemudahan pembuatan serta cepatnya pelaksanaan. Selain itu baja juga memiliki kuat tekan dan tarik yang tinggi. Baja tidak hanya memiliki keuntungan tetapi juga kerugian diantaranya mudah terkena korosi dan tidak tahan terhadap temperatur tinggi. Apabila terjadi korosi pada baja tulangan, maka akan diikuti dengan retak dan pecahnya lapisan beton yang tentunya akan mempercepat reaksi korosi, sehingga lekatan antara baja tulangan dan beton akan berkurang. Hal ini akan berdampak buruk pada umur struktur (McCormac, 2000).

Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBI, 1971), setiap jenis baja tulangan yang dihasilkan oleh pabrik baja yang terkenal dapat dipakai. Setiap pabrik baja pada umumnya mempunyai standar mutu dan jenis baja, sesuai dengan yang berlaku di negara yang bersangkutan. Namun demikian, baja tulangan yang terdapat di pasaran Indonesia dapat dibagi dalam mutu – mutu seperti yang

ditunjukan dalam Tabel 3.3, sedangkan tegangan baja yang diijinkan untuk setiap mutu baja ditunjukan dalam Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.3 Mutu Baja Tulangan

Mutu	**Sebutan**	**Tegangan Leleh Karakkteristik (σ_{au}) atau Tegangan Karakteristik yang memberikan Regangan Tetap 0,2% ($\sigma_{0,2}$) (kg/cm^2)**
U – 22	Baja lunak	2.200
U – 24	Baja lunak	2.400
U – 32	Baja sedang	3.200
U – 39	Baja keras	3.900
U – 48	Baja keras	4.800

(Sumber : PBI, 1971)

Tablel 3.4 Tegangan Baja yang Diijinkan

Mutu	**Tegangan Tarik / Tekan yang Diijinkan $\sigma_a = \sigma_a$' (kg/cm^2)**	
	Pembebanan Tetap	**Pembebanan Sementara**
U – 22	1250	1800
U – 24	1400	2.000
U – 32	1850	2650
U – 39	2250	3.200
U – 48	2750	4.000
Umum	0,58 σ_{au}	0,83 σ_{au}
	0,58 $\sigma_{0,2}$	0,83 $\sigma_{0,2}$

(Sumber : PBI, 1971)

Menurut Harsoadi dan Amin Zainulah, (2007) Baja juga dapat dikategorikan berdasarkan bentuknya. Baja yang seperti ini disebut baja profil. Baja profil adalah baja yang dibentuk khusus dan lebih banyak digunakan untuk

pekerjaan struktur baja. Bentuk-bentuk profil yang paling sering dimanfaatkan untuk pekerjaan struktur baja antara lain baja dalam bentuk balok I, kanal C, T, siku-siku dan lain-lain dan dengan panjang sampai dengan 16 m.

Baja profil siku merupakan bentuk struktur yang memiliki penampang seperti huruf L. Baja profil siku yang sering dugunakan dalam kostruksi terdiri dari dua jenis, yaiut baja siku yang sama sisi dan baja siku yang tidak sama sisi. Baja profil siku diidentifikasi dengan ukuran serta ketebalannya. Ukuran panjang kakinya diukur dari sisi luar siku-siku. Apabila siku-siku mempunyai kaki yang tidak sama, maka ukuran kaki yang lebih panjang ditempatkan pertama dalam pendimensiannya. Dan dimensi ketiga dari ukuran siku-siku adalah ketebalan dari kaki yang mempunyai ketebalan yang sama. Baja profil siku harus digunakan dua atau empat untuk membentuk komponen utama dalam suatu struktur (Harsoadi dan Zainulah, 2007).

3.3 Balok

Menurut Pangestuti, dkk., (2006) balok merupakan batang struktural yang dirancang untuk menahan beban-beban yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap sumbunya. Beban tersebut akan menyebabkan balok melentur sehingga akan terbentuk sejumlah gaya-gaya dalam. Gaya – gaya yang bekerja pada balok meliputi gaya desak dan gaya tarik baja.

Balok harus dirancang agar mengalami keruntuhan tarik, yaitu keadaan di mana terjadi leleh pada tulangan tarik sebelum terjadi kehancuran beton karena tekan. Berdasarkan jenis keruntuhan, balok dapat dikelompokan menjadi :

1. Penampang *Balanced*

   Tulangan tarik mengalami leleh tepat pada saat beton juga mengalami regangan maksimumnya.

2. Penampang *Over – Reinforced*

   Kondisi di mana terjadi keruntuhan pada beton karena tekan sebelum terjadi leleh pada tulangan tarik. Sifat keruntuhan ini terjadi sangat mendadak tanpa ada peringatan (seperti balok melendut atau retak) terlebih dahulu. Keadaan seperti ini sangat membahayakan penghuni bangunan tersebut.

3. Penampang *Under – Reinforced*

   Kondisi keruntuhan di mana tulangan tarik mengalami leleh terlebih dahulu dibandingkan beton. Keadaan seperti menyebabkan beton mengalami lentur terlebih dahulu yang ditandai dengan retak – retak lentur pada penampang beton sebelum beton tersebut mengalami keruntuhan.

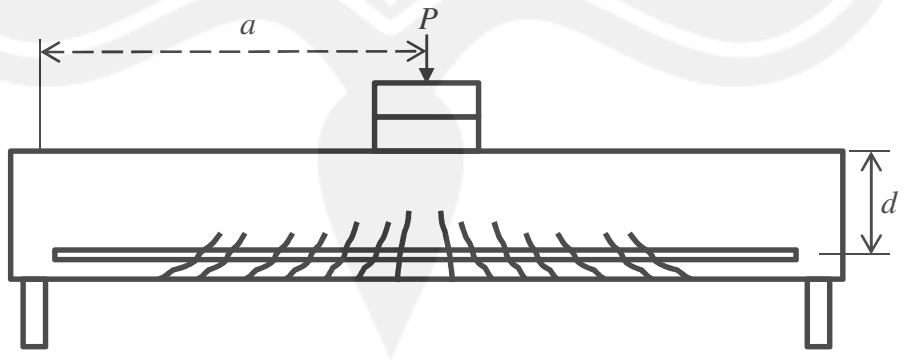
3.4 Keruntuhan Lentur pada Balok

Tegangan lentur merupakan hasil dari momen lentur. Momen lentur terjadi akibat bentang balok menahan beban yang sedang bekerja. Beban yang bekerja pada balok dapat mengakibatkan kondisi tekan dan tarik sehingga balok disebut juga sebagai elemen struktur yang mengalami dua kondisi. Balok yang mengalami keruntuhan lentur akan ditandai dengan munculnya retak – retak halus pada daerah tengah balok.

Daerah balok yang mengalami keruntuhan lentur, retak terutama terjadi pada sepertiga tengah bentang, dan dan arah retak lentur tegak lurus terhadap arah

tegangan utama. Retak-retak ini diakibatkan oleh tegangan geser (*v*) yang sangat kecil dan tegangan lentur (*f*) yang sangat dominan di mana besarnya hampir mendekati tegangan utama horizontal $f_{t(max)}$. Keadaan runtuh lentur yang sepertin ini menyebabkan beberapa retak halus dengan vertikal terjadi di daerah tengah bentang sekitar 50% dari yang diakibatkan oleh beban runtuh lentur (Nawy, 1990). Retakan ini terjadi karena beban bertambah besar sehingga tegangan tarik beton melampui kekuatan tarik beton dan timbul retakan-retakan dibagian yang tertarik (Vis dan Gideon, 1993). Retakan yang terjadi karena keruntuhan lentur ditunjukan pada Gambar 3.1.

Menurut Nawy (1990) tegangan lentur hampir selalu menentukan dimensi geometris penampang beton bertulang. Proses desain yang mencakup pemilihan dan analisis penampang biasanya dimulai dengan pemenuhan persyaratan terhadap lentur, kecuali untuk komponen struktur yang khusus seperti pondasi. Setelah itu faktor lain seperti kapasitas geser, defleksi, retak dan panjang penyaluran tulangan dianalisis sampai memenuhi persyaratan.



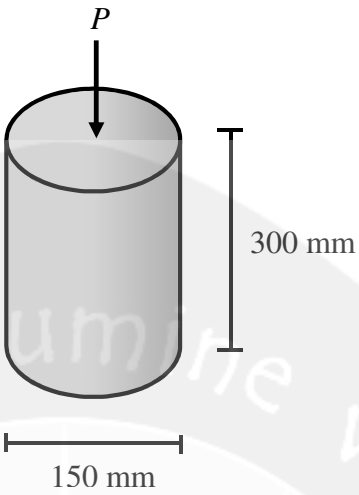
Gambar 3.1 Retak pada Keruntuhan Lentur Balok (*Sumber : Nawy, 1990*)

3.5 Kuat Tekan Beton

Berdasarkan SNI 03 – 1974 – 1990 kuat tekan beton merupakan besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu oleh mesin tekan.

Sifat utama beton adalah memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya. Kekuatan tekan beton adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per satuan luas. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur (Mulyono, 2004). Kualitas atau mutu beton bergantung pada kuat tekan beton yang dihasilkan, bila kuat tekan beton yang dihasilkan semakin tinggi maka mutu beton tersebut akan semakin tinggi, begitu pula sebaliknya.

Nilai kuat tekan beton dapat diperoleh dengan pengujian yang mengacu pada standar yang umumnya digunakan yaitu standar ASTM *(American Society for Testing and Material)*. Kuat tekan masing – masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tertinggi (*fc'*) yang dicapai benda uji dengan umur 28 hari. Nilai kuat tekan beton untuk benda uji dengan dimensi yang berbeda dapat diperoleh dengan mengkonversi hasil kali yang telah tersedia pada SNI – 1974 : 2011. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berbentuk silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.



Gambar 3.2 Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Silinder

Persamaan yang digunakan dalam menentukan nilai kuat tekan beton adalah sebagai berikut :

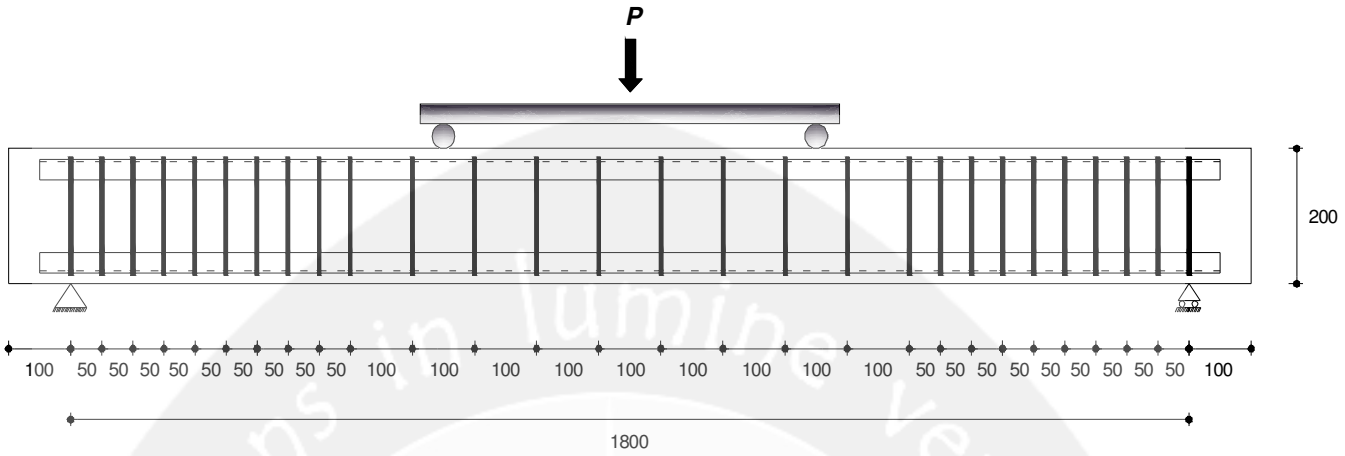
$$fc' = \frac{P}{A} \quad \text{.....(3-1)}$$

keterangan : fc' = Kuat tekan beton (MPa)
A = Luas bidang desak benda uji (mm^2)
P = Beban tekan (N)

3.6 Kuat Lentur Balok

Bentang balok yang menahan beban akan menimbulkan momen lentur. Saat terjadi momen lentur positif, regangan tekan akan terjadi pada bagian atas balok dan regangan tarik akan terjadi pada bagian bawah balok. Oleh karena itu balok yang dirancang harus mampu menahan tegangan tekan dan tarik dalam mempertahankan stabilitasnya.

Penelitian ini menggunakan balok sebagai benda uji dengan ukuran panjang bentang bersih 1800 mm, lebar 125 mm, dan tinggi 200 mm. Pengujian kuat lentur balok ditunjukan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pengujian Kuat Lentur Balok (satuan dalam mm)

Kuat tarik balok dapat dihitung dengan persamaan berikut (Nawy, 1990) :

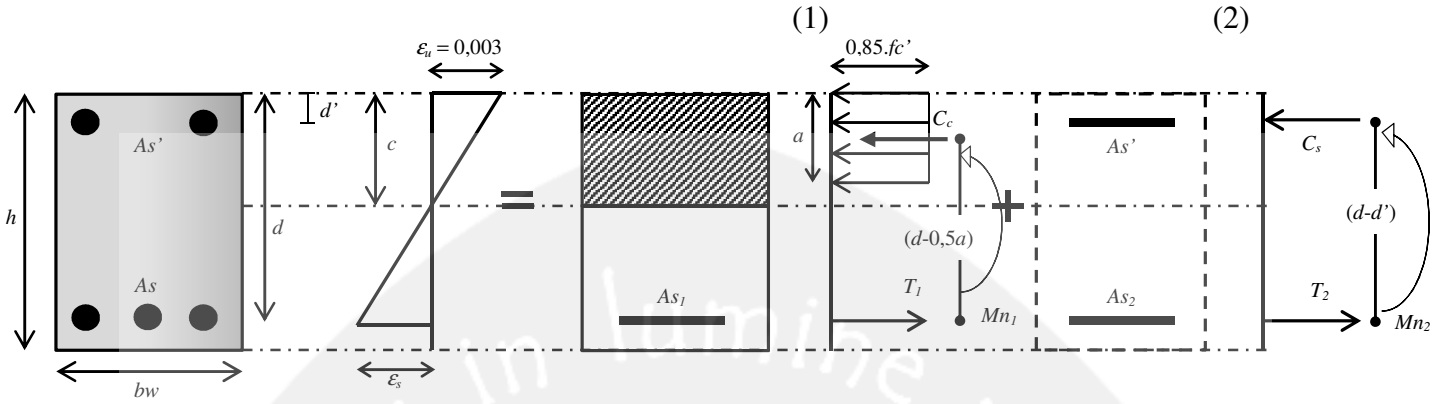
$$fr = \frac{Mc}{I} \quad \text{.....(3-2)}$$

keterangan : fr = Tegangan lentur (MPa)
M = Momen maksimum (Nmm)
c = Letak garis netral (mm)
I = Momen Inersia (mm^4)

3.7 Balok Beton Bertulangan Rangkap

Tulangan rangkap atau ganda pada balok terdiri dari tulangan tarik dan tulangan tekan. Perancangan balok dengan tulangan rangkap dilakukan apabila momen yang bekerja melebihi momen yang dapat dipikul oleh balok dengan tulangan tunggal.

Gaya tekan pada balok beton bertulangan rangkap atau ganda ditahan secara bersama – sama oleh beton (C_c) dan tulangan tekan (C_s), berbeda pada balok beton bertulangan tunggal, semua gaya tekan ditahan hanya oleh beton (C_c). Analisa balok tulangan rangkap ditunjukan pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Distribusi Tegangan dan Regangan pada Penampang Balok Tulangan Rangkap

Penampang balok bertulangan rangkap dapat dianalisis dengan anggapan tampang balok dibagi menjadi dua, seperti pada Gambar 3.4. Terdapat 2 kondisi dalam menganalisis balok tulangan rangkap, yaitu :

1. Tulangan tekan sudah luluh

   Bila tulangan tekan sudah luluh, maka $fs' = fy$

   Gambar 3.4 bagian (1) :

   $T_1 = As_1.fy = C_c$ .....(3-3)

   $Mn_1 = T_1 (d - 0{,}5.a)$ .....(3-4)

   Gambar 3.4 bagian (2) :

   $C_s = As'.fy$ .....(3-5)

   $Mn_2 = C_s (d - d')$ .....(3-6)

   Sehingga momen nominal dan momen *ultimate* balok tulangan rangkap adalah :

   $Mn = Mn_1 + Mn_2$ .....(3-7)

   $Mu = \phi.Mn = 0{,}8.Mn$ .....(3-8)

Tulangan tekan (*As'*) dianggap leleh bila $\varepsilon_{s'} > \varepsilon_y$, dengan nilai ε_y dan $\varepsilon_{s'}$ adalah :

$$\varepsilon_y = \frac{fy}{Es} = \frac{fy}{2x10^5} \quad \text{.....(3-9)}$$

$$\varepsilon_{s\prime} = \frac{\varepsilon_{cu}.(c-d')}{c} = \frac{0{,}003(c-d')}{c} \quad \text{.....(3-10)}$$

2. Tulangan tekan belum luluh

Kondisi tulangan tekan belum luluh bila $\varepsilon_{s'} < \varepsilon_y$

$fs' \neq fy$ .....(3-11)

$fs' = Es.\ \varepsilon_{s'}$ .....(3-12)

Sehingga momen nominal dan momen *ultimate* balok tulangan rangkap adalah :

$Mn = (As.fy - As'.fs').(d - 0{,}5.a) + \{As'.fs'.(d - d')\}$ .....(3-13)

$Mu = \phi.Mn = 0{,}8.Mn$ .....(3-14)

Keterangan :
- Mn = Momen nominal (Nmm)
- Mu = Momen *ultimate* (Nmm)
- C_c = Gaya pada daerah tekan penampang (N)
- C_s = Gaya pada tulangan tekan (N)
- A_s = Luas tulangan tarik (mm^2)
- f_y = Tegangan luluh baja pada daerah tarik balok (MPa)
- f_s' = Tegangan luluh baja pada daerah tekan balok (MPa)
- d = Jarak dari serat tarik terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)
- d' = Jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)
- a = Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (mm)
- c = Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan (mm)
- $\mathcal{E}_{cu}$ = Regangan tekan beton pada batas retak (regangan ultimit), yang menurut pasal 12.2.3 SNI 03-2847-2002 diasumsikan sebesar 0,003
- E_s = Modulus elastis baja non-prategang dengan nilai sebesar 200.000 MPa (MPa)

β_1 = Faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen
- untuk $f_c' \leq 30$ MPa (300 kg/cm^2) berlaku $\beta_1 = 0{,}85$
- untuk $f_c' > 30$ MPa (300 kg/cm^2) berlaku $\beta_1 = 0{,}85 - 0{,}05.((f_c' - 30)/7) \geq 0{,}65$
- nilai β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65

$\emptyset$ = Faktor reduksi sebesar 0,8

3.8 Perancangan Keruntuhan Lentur

Pemeriksaan apakah suatu balok akan mengalami keruntuhan lentur terlebih dahulu daripada keruntuhan geser adalah dengan membandingkan antara V_u dan V_c dapat dilihat pada persamaan di bawah ini :

$$V_u < V_c \quad \text{.....(3-15)}$$

Di mana V_u dapat dihitung dari :

$$\emptyset V_n = V_u \quad \text{.....(3-16)}$$

(SNI 03 – 2847 – 2002 Pasal 13.1.1)

Dengan *Vu* adalah gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau dan *Vn* adalah kuat geser nominal yang dihitung dari :

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{.....(3-17)}$$

(SNI 03 – 2847 – 2002 Pasal 13.1.1)

Gaya geser tahanan nominal *Vc* dapat dihitung dari :

$$V_c = \frac{1}{6} \times \sqrt{f_c'} \times b_w \times d \quad \text{.....(3-18)}$$

(SNI 03 – 2847 – 2002 Pasal 13.3.1.1)

Apabila tidak memenuhi syarat seperti pada rumus 3-15, maka diperlukannya desain tulangan geser.

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s}$$ .....(3-19)

Maka jarak antar sengkang dapat dicari dengan rumus :

$$s = \frac{A_v \times f_y \times d}{V_s}$$ .....(3-20)

Dengan jarak sengkang maksimum :

$$S_{maks} = \frac{d}{2}$$ .....(3-21)

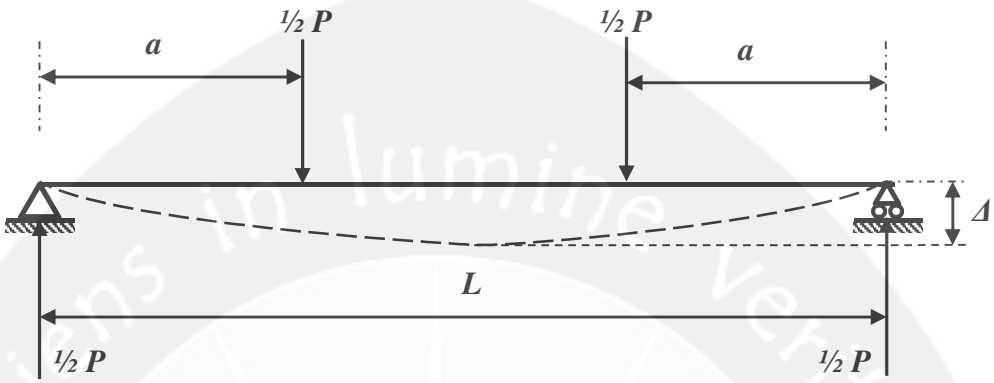
Keterangan : V_s = Kuat geser nominal yang disumbangkan oleh tulangan geser (kN)
V_n = Kuat geser nominal (kN)
V_c = Kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton (kN)
f'_c = Kuat tekan beton (MPa)
b_w = Lebar badan (mm)
A_v = Luas tulangan geser dalam daerah sejarak s (mm^2)
f_y = Kuat leleh yang disyaratkan untuk tulangan baja non prategang (MPa)
d = Jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan tarik longitudinal (mm)
s = Jarak antar sengkang (mm)

3.9 Hubungan Beban dan Defleksi

Defleksi atau lendutan pada balok terjadi akibat pembebanan. Apabila beban bertambah maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan sehingga mengakibatkan muncul dan bertambahnya retak lentur di sepanjang bentang balok (Nawy, 1990).

Berdasarkan SNI 03 – 2847 – 2002, komponen struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan/deformasi apapun yang dapat memperlemah kekuatan ataupun mengurangi kemampuan layan struktur pada beban kerja. Walaupun telah dicek keamanan terhadap lentur dan geser, balok bisa tidak layak

apabila terlalu fleksibel atau lentur. Maka tinjauan defleksi balok merupakan salah satu bagian dari proses desain (Spiegel dan Limbrunner, 1991).



Gambar 3.5 Lendutan Balok Dipengaruhi Beban Terpusat

Nilai defleksi dapat dihitung dengan persamaan beriku :

$$EI\Delta = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\frac{L}{2}\right)\left(\frac{2}{3}\frac{L}{2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{L-2a}{2}\right) \times \left[-\left(\frac{P}{2}\frac{L}{2} - \frac{P}{2}a\right)\right]\left[a + \frac{2}{3}\left(\frac{L-2a}{2}\right)\right] \quad ...(3\text{-}22)$$

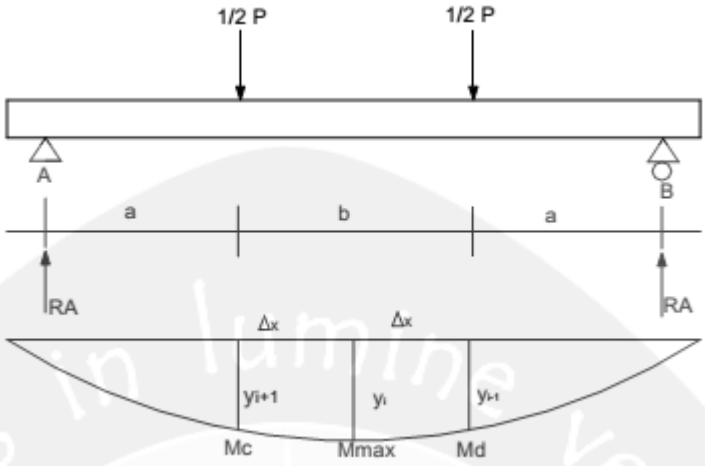
$$EI\Delta = \frac{PL^2}{16} - \frac{Pa^3}{12} \quad .....(3\text{-}23)$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI}\left(\frac{3a}{L} - \frac{4a^3}{L^3}\right) \quad .....(3\text{-}24)$$

Keterangan : E = Modulus elastisitas beton (MPa)
I = Momen inersia balok (mm^4)
Δ = Defleksi (mm)
P = Beban luar (N)
L = Bentang balok (mm)
a = Jarak beban dari tumpuan (mm)

3.10 Kelengkungan Balok

Pada suatu potongan balok kelengkungan dapat ditentukan dengan pendekatan metode *central difference* dengan memanfaatkan tiga titik diskrit yang berurutan (Chapra dan Canale, 1989). Mengacu kepada Gambar 3.6 dan dari *deret taylor* :



Gambar 3.6 Lendutaoen Balok Tumpuan Sederhana Akibat Beban Terpusat
(*Sumber : Chapra dan Canale, 1989*)

$$f(y_{i+1}) = f(y_i) + f^i(y_i)\Delta x + \frac{f"(y_i)}{2}\Delta x^2 + \cdots \quad \text{.....(3-25)}$$

Untuk mendapatkan turunan kedua digunakan *f(yi+2)* sehingga *deret taylor* adalah sebagai berikut :

$$f(y_{i+2}) = f(y_i) + f^i(y_i)2\Delta x + \frac{f"(y_i)}{2}(2\Delta x)^2 + \cdots \quad \text{.....(3-26)}$$

Apabila persamaan 3-25 dikalikan 2 kemudian untuk mengurangkan persamaan 3-26, maka diperoleh :

$$f(y_{i+2}) - 2f(y_{i+1}) = -f(y_i) + \frac{f"(y_i)}{2}\Delta x^2 \quad \text{.....(3-27)}$$

$$f"(y_{i+2}) = \frac{f(y_{i+1}) - 2f(y_i) + f(y_{i+1})}{\Delta x^2} \quad \text{.....(3-28)}$$

Untuk bentang tengah :

$$f"(y_i) = \frac{f(y_{i+1}) - 2f(y_i) + f(y_{i+1})}{\Delta x^2} \quad \text{.....(3-29)}$$

Di mana,

$$f" = \frac{d^2y}{dx^2} = \phi \quad \text{..... (3-30)}$$

Sehingga :

$$\phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad \text{..... (3-31)}$$

3.11 Beban pada Saat Retak Pertama

Modulus retak (f_r)

$$f_r = 0{,}7 \times \sqrt{f_c'} \quad \text{..... (3-32)}$$

(Vis dan Gideon 1993 : 37)

Momen retak (M_{cr})

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I}{y} \quad \text{..... (3-33)}$$

(SNI 03-2847-2002 11.5.2(3))

Kelengkungan saat retak (ϕ_{retak})

$$\phi_{retak} = \frac{f_r / E_c}{y} \quad \text{..... (3-34)}$$

Dengan modulus beton normal,

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad \text{..... (3-35)}$$

Keterangan :
- f_r = Modulus retak beton (MPa)
- f_c' = Kuat tekan beton (MPa)
- M_{cr} = Momen retak (Nmm)
- I = Momen inersia penampang (mm^4)
- y = Jarak antara titik berat desak beton ke titik berat tarik beton (mm)
- ϕ_{retak} = Lendutan (1/mm)
- E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

3.12 Beban pada Saat Luluh Pertama

Dengan menganggap beban elastis, maka :

$$M_y = A_s \, x \, f_y \, x \, z \quad \text{..... (3-36)}$$

Keterangan :
- M_y = Momen saat luluh (Nmm)
- A_s = Luas tulangan tarik (mm^2)
- f_y = Kuat leleh yang disyaratkan untuk tulangan baja non-prategang (MPa)
- z = Jarak antara gaya C_c ke C_s (mm)