

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton umumnya tersusun dari tiga bahan penyusun utama yaitu semen, agregat dan air. Jika diperlukan, bahan tambah (*admixture*) dapat ditambahkan untuk mengubah sifat-sifat tertentu dari beton yang bersangkutan. Semen merupakan bahan campuran yang secara kimiawi aktif setelah berhubungan dengan air. Agregat tidak memainkan peranan yang penting dalam reaksi kimia tersebut, tetapi berfungsi sebagai bahan pengisi mineral yang dapat mencegah perubahan-perubahan volume beton setelah pengadukan selesai dan memperbaiki keawetan beton yang dihasilkan. Beton merupakan material komposit yang terdiri dari agregat, umumnya pasir dan kerikil, terikat secara kimiawi dengan semen portland yang terhidrasi. Ukuran agregat umumnya tergradasi dari pasir hingga kerikil, dengan ukuran kerikil maksimum dalam beton struktural biasanya $\frac{3}{4}$ in., meskipun agregat berukuran $\frac{3}{8}$ in. atau $1\frac{1}{2}$ in. juga memungkinkan untuk digunakan (James K. Wight & James G MacGregor, 2012).

Pada umumnya, beton mengandung rongga udara sekitar 1%-2%, pasta semen (semen dan air) sekitar 25%-40%, dan agregat (agregat halus dan agregat kasar) sekitar 60%-75%. Untuk mendapatkan kekuatan yang baik, sifat dan karakteristik dari masing-masing bahan penyusun tersebut perlu dipelajari.

Kelebihan dan kekurangan beton antara lain sebagai berikut :

Kelebihan Beton:

1. Kemampuan beton menahan gaya tekan sangat baik, serta memiliki sifat tahan terhadap korosi dan pembusukan yang disebabkan kondisi lingkungan.
2. Beton segar dapat dengan dicetak dengan mudah. Cetakan dapat digunakan berulang kali sehingga lebih ekonomis.
3. Beton tahan aus serta tahan bakar, maka dari itu perawatan lebih murah.

Kekurangan Beton:

1. Beton dianggap tidak mampu untuk menahan gaya tarik, sehingga mudah retak. Sehingga membutuhkan baja untuk menahan gaya tarik.

2. Beton menyusut dan juga mengembang apabila terjadi perubahan suhu, maka perlu dibuat dilatasi (*expansi join*) mencegah terjadinya retakan – retakan.
3. Untuk mendapatkan beton kedap air, pengerjaan beton harus secara teliti.

2.1.1 Semen

Semen portland dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Berat jenisnya berkisar antara 3,12 dan 3,16, dan berat volume satu sak semen adalah 94 lb/ft^3 .

Bahan baku pembentuk semen adalah :

1. Kapur (CaO) – dari batu kapur,
2. Silica (SiO_2) – dari lempung,
3. Alumina (Al_2O_3) – dari lempung

(dengan sedikit persentase magnesia, MgO , dan terkadang sedikit alkali). Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya.

Dalam proses pembuatan beton semen berfungsi sebagai perekat hidrolis campuran. Perekat hidrolis sendiri adalah suatu bahan yang apabila dicampur dengan air akan membentuk pasta kemudian mengeras dan setelah mengeras tidak larut kembali dalam air. Pengikatan ini terjadi akibat adanya rekristalisasi dalam bentuk *interlocking-crystals* yang menghasilkan gel semen saat semen terhidrasi.

Berdasarkan SK SNI T-15-1990-03, semen adalah suatu hasil produksi yang dibuat di pabrik-semen. Pabrik-pabrik semen memproduksi bermacam-macam jenis semen dengan sifat-sifat dan karakteristik yang berlainan.

Semen dibedakan dalam dua kelompok utama yakni:

1. Semen dari bahan klinker-semen-portland
 - a. Semen portland,
 - b. Semen portland abu terang,
 - c. Semen portland berkadar besi,
 - d. Semen tanur-tinggi (*'hoogovenement'*),
 - e. Semen portland tras/pozzoland,
 - f. Semen portland putih.
2. Semen-semen lain
 - a. Alumunium semen,

b. Semen bersulfat.

Dalam SNI 15-2049-2004 semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. semen portland digolongkan menjadi 5 jenis menurut penggunaannya. Berikut jenis semen tersebut :

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

Dalam SNI-15-0302-2004, semen PPC (*Portland Pozzolan Cement*) yaitu suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dengan pozzolan halus, yang di produksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozzolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozzolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozzolan 6% sampai dengan 40% massa semen portland pozzolan. Semen PPC dibagi 4 (empat jenis) menurut jenis dan penggunaannya yaitu :

1. Jenis IP-U yaitu semen portland pozzolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton.
2. Jenis IP-K yaitu semen portland pozzolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton, semen untuk tahan sulfat sedang dan panas hidrasi sedang.
3. Jenis P-U yaitu semen portland pozzolan yang dapat dipergunakan untuk pembuatan beton dimana tidak disyaratkan kekuatan awal yang tinggi.
4. Jenis P-K yaitu semen portland pozzolan yang dapat dipergunakan untuk pembuatan beton dimana tidak disyaratkan kekuatan awal yang tinggi, serta untuk tahan sulfat sedang dan panas hidrasi rendah.

Semen sangat berpengaruh dalam hasil akhir beton yang dicetak. Nawy (2008) menjelaskan bahwa ukuran partikel semen memiliki pengaruh yang besar terhadap kelajuan reaksi antara semen dan air. Untuk suatu berat tertentu, semen halus memiliki luas permukaan partikel yang lebih besar daripada semen yang kasar. Ini menyebabkan kecepatan reaksi antara semen dengan air lebih tinggi, yang berarti proses pengerasan akan lebih cepat untuk yang permukaannya lebih besar. Sifat yang berhubungan dengan pengaruh kehalusan butiran semen adalah :

1. Kekuatan awal beton yang tinggi
2. Cepat mundurnya mutu semen jika terpengaruh cuaca
3. Reaksi kuat dengan bahan-bahan yang reaktif
4. Mengurangi retak-retak
5. Daya penyusutan beton yang tinggi
6. Pengikatan awal yang cepat
7. Kebutuhan air pada beton yang lebih banyak
8. Mengurangi *bleeding* ketika proses pengecoran

Disintegrasi beton akibat pembasahan, pendinginan, pencairan, dan pengeringan, juga penjalaran retak, merupakan hal-hal yang sangat penting. Adanya rongga-rongga udara pada pasta semen menambah daya tahan beton terhadap disintegrasi. Ini dapat dicapai dengan penambahan campuran tambahan pada waktu pengadukan yang menghasilkan *air-entrained* pada beton.

Sedangkan untuk disintegrasi kimiawi pada struktur beton, seperti pada struktur pelabuhan dan substruktur dapat diperlambat atau dicegah dengan menggunakan semen jenis II karena beton pada struktur tersebut diekspos terhadap klorida dan terkadang magnesium sulfat dan sodium sulfat.

2.1.2 Air

Dalam proses pembuatan beton, air digunakan sebagai pemicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Pada umumnya air minum dapat dipakai sebagai campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila dipakai dalam campuran beton akan menurunkan kualitas beton, bahkan dapat mengubah sifat-sifat beton yang dihasilkan.

Karena pasta semen merupakan hasil reaksi kimia antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total berat campuran yang penting, tetapi justru perbandingan air dengan semen atau yang biasa disebut sebagai Faktor Air Semen (*water cement ratio*). Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya, sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton. Adapun persyaratan untuk jenis air yang bisa untuk digunakan pada campuran beton sebagai berikut:

1. Air dengan pH antara 6 sampai 8 dan rasanya tidak payau, air yang mengandung bahan organik dapat menghambat proses pengerasan beton.
2. Air yang digunakan tidak mengandung garam-garam yang bisa merusak beton (asam, zat organik dan sebagainya).
3. Air tidak boleh mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gr/lit
4. Tidak boleh mengandung senyawa-senyawa sulfat lebih dari 1 gr/lit yang bisa menurunkan kualitas pada beton.

2.1.3 Agregat halus

Agregat halus adalah agregat yang memiliki ukuran butir antara 4,75 mm sampai dengan 0,150 mm. Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir olahan atau gabungan dari kedua jenis pasir tersebut. Agregat halus yang baik harus bebas dari bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan no.100 (0,150 mm), atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton (Nawy, 2008:15). Variasi ukuran butir agregat halus harus mempunyai gradasi yang baik agar didapatkan kepadatan maksimum dari beton. Persyaratan gradasi agregat halus sebagai berikut:

Tabel 2.1
Batasan Gradasi Agregat Halus SNI 03-2834-2000

Lubang Ayakan (mm)	Persen bahan butiran yang lewat ayakan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber : SNI 03-2834-2000

Keterangan : Daerah I : Pasir kasar Daerah III : Pasir agak halus
Daerah II : Pasir agak kasar Daerah IV : Pasir halus

1. Modulus Halus Butir (MHB) agregat halus sesuai ASTM C-33 yaitu 2,20%-3,10%.
MHB 2,5 s/d 3,0 disarankan untuk beton mutu tinggi.
2. Berat jenis (*specific gravity*) agregat halus sesuai ASTM C-33 yaitu 1,60-3,20 kg/liter.
3. Absorpsi (penyerapan air) sesuai ASTM C-33 yaitu 0,2%-2,0%.
4. Spesifikasi berat volume sesuai ASTM C-33 yaitu 3%-5%.
5. Kadar lumpur agregat halus sesuai spesifikasi ASTM C-33 yaitu 0,2%-6,0%.

2.1.4 Agregat kasar

Agregat kasar berdasarkan ASTM C-33, memiliki batas bawah pada ukuran 4,75 mm atau ukuran saringan no.4 (ASTM). (Nawy, 2008:14) menjelaskan, agregat disebut agregat kasar apabila ukurannya sudah melebihi ¼ in. (6 mm). Sifat agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca, dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar mineral ini harus bersih dari bahan-bahan organik, dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan gel semen.

Jenis agregat kasar yang umum digunakan adalah :

1. Batu pecah alami, didapatkan dari cadas atau batu pecah alami yang digali.

2. Kerikil alami, didapatkan dari pengikisan tepi maupun dasar sungai oleh air sungai yang mengalir.
3. Agregat kasar buatan, berupa *slag* atau *shale* yang digunakan untuk beton berbobot ringan.

Dalam perencanaan beton, salah satu faktor yang perlu diperhatikan adalah *workability*. Dengan *workability* yang cukup, segregasi pada beton akan berkurang sehingga didapatkan kepadatan beton yang maksimum. Distribusi ukuran agregat berpengaruh pada kemudahan pengerjaan beton. Gradasi agregat yang baik adalah agregat yang memiliki distribusi ukuran butir agregat yang beraturan. Gradasi agregat yang demikian akan memberikan kepadatan yang cukup untuk mengoptimalkan kekuatan akhir beton. Dalam SNI 03-1750-1990 terdapat syarat mengenai batasan gradasi agregat kasar sebagai berikut :

Tabel 2.2

Persyaratan Batas-Batas Susunan Besar Butir Agregat Kasar Sesuai SNI 03-2834-2000

Ukuran Lubang Ayakan (mm)	Persentase berat bagian yang lewat ayakan		
	Ukuran nominal agregat (mm)		
	38 – 4,76	19 – 4,76	9,6 – 4,76
38,1	95 – 100	100	
19	37 – 70	95 – 100	100
9,52	10 – 40	30 – 60	50 – 85
4,76	0 - 5	0 – 10	0 – 10

Sumber : SNI 03-2834-2000

Modulus Halus Butir (MHB), modulus kehalusan butir (*Fineness Modulus*) atau MHB, spesifikasi modulus halus butir agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 5,5%-8,5%.

- a. Absorpsi dan berat jenis (*specific gravity*) agregat kasar, spesifikasi berat jenis agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 1,60-3,20 kg/liter dan absorpsi pada nilai 0,2-0,4%. Untuk beton mutu tinggi akan baik dengan absorpsi kurang dari 1%.
- b. Berat volume agregat kasar, spesifikasi berat volume agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 1,6-1,9 kg/liter.
- c. Kadar air agregat kasar, spesifikasi kadar air agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 0,5%-50%.
- d. Kadar lumpur agregat kasar sesuai spesifikasi ASTM C-33 yaitu 0,2%-1,0%.

Persentase keausan agregat kasar sesuai spesifikasi ASTM C-33 adalah 15%-50%.

Kerikil merupakan batu andesit yang termasuk dalam golongan batuan beku vulkanik hasil erupsi atau letusan gunung api. Batuan ini mengandung silika 56,77 %, padat, keras, mempunyai tekstur halus, berwarna abu-abu kegelapan sampai hitam. Secara fisik batu andesit mempunyai berat jenis antara 1,6-2,9 dengan berat isi sebesar 1635-2870 kg/m³, porositas sebesar 1-2%, absorbsi sekitar 0,8% dan kekerasan berkisar 5-6 Moh's. Secara mekanis batu andesit memiliki kuat tekan sebesar 60-240 MPa, modulus elastisitas sebesar 20-60 MPa dan kuat tarik belah sebesar 13-20 MPa.

2.1.5 Batuan *Onyx*

Onyx berasal dari endapan batu kapur gua batu kapur, di mana ia membentuk stalaktit, stalagmit, dan formasi lainnya yang bisa mengisi seluruh gua atau ruang hampa. Hal ini didepositkan oleh gerakan air yang lembut dan menetes diikuti oleh penguapan antara tetesan yang mengimbangi kalsium karbonat dari air ke formasi, secara bertahap memperbesar formasi dengan seperseribu inci atau kurang per tetes. Dengan demikian *onyx* juga merupakan batu sedimen kimiawi, dan mungkin menyelimuti fosil terestrial tetap ada. Jenazah prasejarah manusia telah ditemukan terbungkus di gua *onyx*. Meskipun proses penambahan bahan drop-by-drop ini memakan waktu, endapan *onyx* yang besar mulai matang (mengisi gua atau fraktur) dalam waktu geologis yang relatif singkat.

Marble Institute of America (2016) menjelaskan, *onyx* terdiri dari mikrokristalin yang berupa kalsit kasar dan biasanya juga mengandung aragonit. Mikrokristal tersebut terbentuk sebagai material bertekstur serat dan lamelar. Biasanya batuan ini tersusun sebagai material yang tembus cahaya dengan berbagai warna yang tergantung pada jumlah zat oksida besi yang bervariasi, warna kuning coklat yang ada pada *onyx* terjadi akibat adanya oksida besi, namun ada juga yang keputih – putihan, kuning muda, orange madu, kuning, merah dan hijau gelap.

Marble Institute (2016), juga menjelaskan tentang sifat mekanik dari beberapa batuan *onyx* didunia yaitu :

Tabel 2.3
Sifat Mekanik *Onyx*

	Country	Absorption % by Weight	Density		Compressive Strength		Flexural Strength	
	of Origin		kg/m ³	lbs/ft ³	MPa	lbs/in ²	MPa	lbs/in ²
Akhisar Onyx ₍₁₎	Turkey	0.30%	2,700	168.6	39.2	5,690	11.4	1,650
Songwe Onyx ₍₂₎	Tanzania	0.07%	2,770	172.9				
Onice Smeraldo ₍₃₎	Iran	0.19%	2,900	181.0	53.0	7,680		
Onice Verde ₍₃₎	Pakistan	0.15%	2,548	159.1	48.1	6,970	11.4	1,650
Honey Onyx ₍₄₎	Turkey	0.50%	2,690	167.9	84.5	12,260	7.7	1,120
White Onyx ₍₅₎	Iran	0.03%	2,700	168.6	79.9	11,590		
Orange Onyx ₍₅₎	Iran	0.03%	2,720	169.8	75.9	11,010		
Light Green Onyx ₍₅₎	Iran	0.02%	2,730	170.4	105.1	15,240		
Vista Grande Onyx ₍₄₎	USA	0.11%	2,589	161.6	46.0	6,668	4.5	656
Multicolor Onyx ₍₄₎	Pakistan	0.12%	2,730	170.4	133.1	19,300	4.6	667
Rosa Grande Onyx ₍₄₎	USA	0.11%	2,589	161.6	46.0	6,668	4.5	656
Light Green Onyx ₍₄₎	Pakistan	0.01%	2,728	170.3	139.3	20,208	9.1	1,313

Sumber : *Marble Institute* (2016)

Limbah *Onyx* ini mempunyai ciri – ciri sebagai berikut (Aditya, 2012):

1. Berwarna putih kecoklatan.
2. Mempunyai permukaan yang tajam dan keras, sehingga memberikan ikatan yang kuat pada pasta semen.
3. Limbah *Onyx* ini lebih bersih dari lempung dan lumpur, yang dapat menghalangi ikatan dengan pasta semen.
4. Pasir *Onyx* mempunyai karakteristik yang sama dengan pasir sungai, tetapi dalam pasir *Onyx* ini berwarna putih kecoklatan dan mempunyai butir – butir halus dengan ukuran butiran antara 0,5 dan 5 mm. Dimana butiran ini hampir mendekati karakteristik pasir yang berasal dari kikisan bebatuan yang berasal dari sungai.
5. Kerikil *Onyx* mempunyai karakteristik bentuk yang tajam, keras, dengan ukuran ≥ 5 mm sampai dengan 30 mm.
6. Tidak mengandung bahan organik, sehingga proses pengerasan semen tidak terhambat, karena bahan organik dapat menghambat pengerasan semen.



Gambar 2.1 Limbah batu *Onyx*

Onyx adalah jenis batu kuarsa yang sering disebut juga dengan marmer tembus cahaya. Umumnya berwarna putih kekuningan dan agak bening sehingga tembus pandang. *Onyx* terjadi pada rongga atau tekanan batu kuarsa yang berasal dari larutan kalsium karbonat baik yang terjadi pada temperature panas atau dingin, sehingga terjadi pengkristalan. Menurut Herve Nicolas Lazzarelli, (Blue Chart Gem Identification, 2010) batu *onyx* memiliki indeks kekerasan 6,5 – 7 mohs dengan berat jenis 2,55 hingga 2,70. Sedangkan dari hasil uji laboratorium didapatkan keausan sebesar 24% (Anissa, 2016, pp. 30)

Mineralogi

Onyx terbentuk dari metamorfosis batu kapur atau dolomit. Perbedaan batu *onyx* dari batu karbonat sedimen, yaitu Kristal yang besar. Komponen mineral utama adalah Kalsit, yang sering disertai kuarsa, grafit, hematit, limotit, pirit dan sebagainya.

Petrologi

Onyx adalah batuan metamorf yang terbentuk dari metamorfosis batuan kapur dolomit yang mengandung lempung. Dikelas bawah sampai menengah, Dolomit berubah menjadi *Onyx*, seperti kalsit asalkan tidak ada silika di lingkungannya.

Analisis Fisik

- *Onyx* mengandung Quartz atau mineral silika menunjukkan kekuatan lebih baik
- Penyerapan air kurang dari 1%
- Kekuatan tekan antara 19 – 140 Mpa, dan kekuatan tekan rata – rata 110 Mpa
- Kekuatan lentur 6 – 15 Mpa
- Kekuatan tarik rata – rata 4 Mpa

- Porositas rendah dan bervariasi antara 0,3% sampai 1,2%

Batuan alam yang ada dipermukaan bumi diklasifikasikan sebagai berikut:

- Batuan beku (batuan vulkanis)
- Batuan sedimen atau batuan sekunder
- Batuan metamorf atau malihan

Dari ketiga jenis batuan tersebut batu *onyx* tergolong dalam batuan metamorf karena bentuk batu *onyx* menyerupai batu topas yang tergolong dalam batuan metamorf kontak pneumatolis. Batu topas terbentuk dari batu kuarsa yang mengalami metamorfosa akibat adanya pengaruh gas-gas pada magma yaitu gas fluorium.



Gambar 2.2 Batu Topas

Sumber : <http://geograph88.blogspot.co.id>



Gambar 2.3 Batu *onyx*

2.1.6 *Mix design*

Perencanaan campuran (*Mix design*) bertujuan untuk mengetahui komposisi atau proporsi bahan-bahan penyusun beton. Hal ini dilakukan agar proporsi campuran dapat memenuhi syarat teknis dan ekonomis. Penentuan proporsi campuran dapat digunakan dengan beberapa metode sebagai berikut dalam:

1. Metode *American Concrete Institute* (ACI) menjelaskan suatu campuran perancangan beton dengan mempertimbangkan sisi ekonomisnya adalah dengan memperhatikan adanya bahan-bahan di lapangan, kemudahan dalam pelaksanaan pekerjaan, dan baiknya kekuatan beton. Cara ACI melihat bahwa dengan ukuran agregat tertentu, jumlah air perkubik akan menentukan tingkat konsistensi dari campuran beton yang pada akhirnya akan mempengaruhi pelaksanaan pekerjaan (*workability*).
2. Metode Road Note No.4, cara perancangan ini ditekankan pada pengaruh gradasi agregat terhadap kemudahan pengerjaan.
3. Metode SNI 03-2834-2000. Current British Method (D0E), disusun oleh British Departement of Environment pada tahun 1975 untuk menggantikan Road Note.4 di Inggris. Untuk kondisi di Indonesia telah diadakan penyesuaian pada besarnya variasi kuat tekan beton.
4. Metode desain campuran *Portland Cement Association* (PCA) dasarnya serupa dengan metode ACI sehingga secara umum hasilnya akan saling mendekati. Penjelasan lebih detail dapat dilihat dalam Publikasi PCA, *Portland Cement Association, Design and Control of Concrete Mixtures, 12th edition., Skokie, Illinois, USA:PCA, 1979,140 pp.*
5. Metode campuran Coba-coba, cara coba-coba dikembangkan berdasarkan cara metode ACI, Road Note No.4 dan SK.SNI T-15-1990-03, setelah dilakukan pelaksanaan dan evaluasi.

2.2 Beton Bertulang

Beton kuat menahan tekan dan lemah menahan tarik, maka beton dapat mengalami retak jika beban yang dipikul melebihi batas kuat tarik beton. Sehingga diperlukan tulangan baja yang berfungsi menyediakan kuat tarik pada beton. Penambahan tulangan pada beton disebut dengan istilah beton bertulang.

Beberapa dasar kerjasama antara beton dengan baja tulangan :

- Lekatan sempurna antara batang tulangan baja dengan beton keras yang membungkusnya sehingga tidak terjadi penggelinciran.
- Beton bersifat kedap air sehingga melindungi baja dari korosi

- Angka kecepatan muai kedua bahan hampir sama, beton sekitar 0,00001 sampai 0,000013 sedang baja 0,000012.

Menurut SNI 03-2847-2013 pada perhitungan struktur beton bertulang, beberapa istilah kekuatan suatu penampang adalah sebagai berikut :

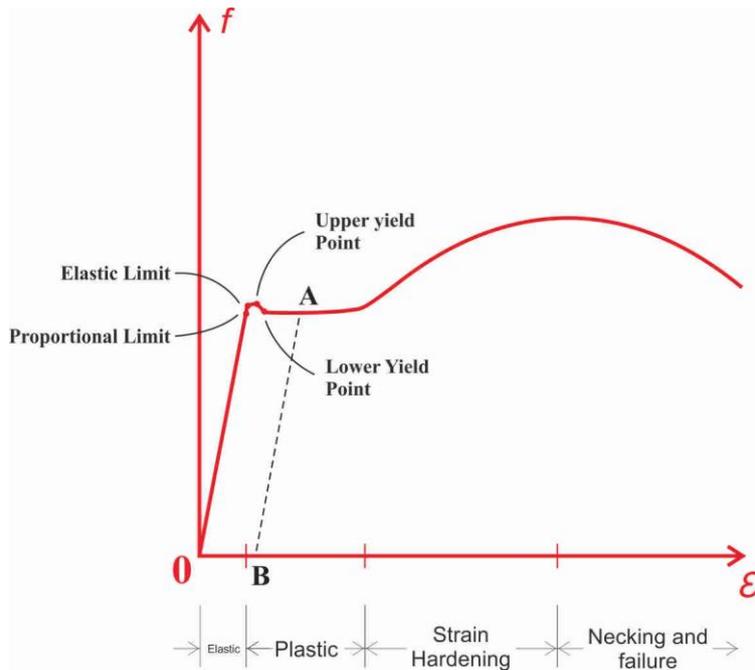
1. Kuat Nominal, kuat suatu kompone struktur atau penampang yang dihitung berdasarkan ketentuan dan asumsi perencanaan sebelum dikalikan dngan nilai factor reduksi kekuatan yang sesuai. Kekuatan beton pada kondisi normal.
2. Kuat perlu, kuat suatu kompone struktur atau penampang yang diperlukan untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya dalam yang berkaitan dengan beban tersebut dalam suatu kombinasi seperti dalam peraturan SNI 03-2847-2013
3. Kuat rencana, kuat noinal dikalikan dengan suatu factor reduksi kekuatan ϕ untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya yang berkaitan dengan beban tersebut dalam suatu kombinasi beban.

Baja tulangan merupakan komponen dari beton bertulanga, Baja tulangan untuk beton terdiri batang, kawat, dan jaringan kawat baja las yang seluruhnya dirakit sesuai standar ASTM. Sifat – sifat terpenting baja tulangan adalah sebagai berikut :

- 1) Modulus Young, E_s
- 2) Kekuatan leleh, f_y
- 3) Kekuatan batas, f_u
- 4) Mutu baja yang ditentukan
- 5) Diameter batang atau kawat

Kurva tegangan – regangan tipikal untuk mutu baja 40, 60, dan 75. Untuk hampir semua baja, perilakunya diasumsikan elastisitas dan modulus Young diambil sebesar 29×10^9 psi (200×10^6 Mpa).

Hubungan antara tegangan dan regangan tarik baja tulangan dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Hubungan antara Tegangan dan Regangan Tarik Baja Tulangan

Sumber: William T.Segui, 2007

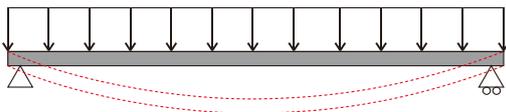
Keterangan berikut merupakan penjelasan dari Gambar 2.4 :

1. Dalam zona awal regangan, tegangan dan regangan bersifat proporsional, kemiringan linier yang ada merupakan modulus young (E) yang disebut juga sebagai modulus elastisitas. Daerah ini dinamakan sebagai zona elastik, zona ini berakhir dengan ditandai tercapainya kelelehan material (f_y).
2. Setelah awal kelelehan terjadi zona berbentuk garis datar (*flat plateau*), pada zona ini setiap peningkatan nilai regangan yang terjadi tidak ada peningkatan tegangan yang mengiringinya. Daerah ini disebut sebagai zona plastik.
3. Saat zona plato plastik berakhir, *strain hardening* mulai terjadi dan secara bertahap meningkatkan nilai tegangan sampai mencapai ultimit (f_u). Setelah itu tegangan cenderung menurun dengan bertambahnya regangan sebagai indikasi masuknya daerah *necking* yang akan diakhiri dengan kegagalan fraktur.

Bahan baja yang dinilai baik dalam kontribusinya terhadap perilaku struktur terutama dalam memikul beban gempa (siklik) yaitu yang memiliki daerah *strain hardening* dan daerah *necking* yang panjang. Sifat ini menyebabkan baja akan berperilaku daktail sehingga secara struktural akan berperan besar dalam proses redistribusi tegangan saat terjadinya plastifikasi.

2.3 Balok Bertulangan Tunggal

Balok (*Beam*) merupakan bagian dari struktur yang berfungsi sebagai pemikul beban transversal, suatu balok dapat dianalisa secara lengkap apabila diagram gaya geser dan diagram momennya telah diperoleh. Balok adalah elemen struktur yang mengalami beban lateral, gaya-gaya bekerja dalam arah tegak lurus sumbu batang. Jika semua beban bekerja di bidang yang sama, dan jika semua defleksi (yang ditunjukkan dengan garis putus-putus) terjadi di bidang tersebut, maka bidang tersebut disebut bidang lentur.



Gambar 2.5 Lentur pada Balok

Beban-beban luar yang bekerja pada struktur akan menyebabkan lentur dan deformasi pada elemen struktur. Lentur yang terjadi pada balok merupakan akibat adanya regangan yang timbul karena adanya beban dari luar. Apabila beban luar yang bekerja terus bertambah, maka balok akan mengalami deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila bebannya terus bertambah sampai batas kapasitas baloknya, maka balok akan runtuh. Taraf pembebanan seperti ini disebut dengan keadaan limit dari keruntuhan pada lentur. Oleh karena itu, pada saat perencanaan, balok harus didesain sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak berlebihan pada saat beban bekerja dan mempunyai keamanan cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami runtuh.

Adapun jenis-jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok beton bertulang adalah sebagai berikut :

1. Keruntuhan tarik (*Under-Reinforced*)

Keruntuhan tarik terjadi bila jumlah tulangan baja tarik sedikit sehingga tulangan tersebut akan leleh terlebih dahulu sebelum betonnya pecah, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih besar dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu perilakunya sama seperti yang dilakukan pada pengujian yaitu terjadi keretakan pada balok tersebut.

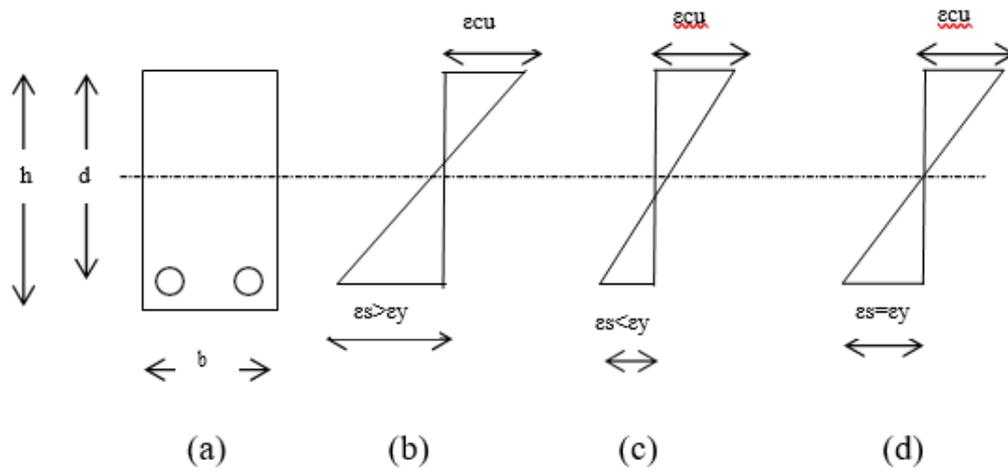
2. Keruntuhan tekan (*Over-reinforced*)

Keruntuhan tekan terjadi bila jumlah tulangan vertikal banyak maka keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih kecil dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu sifat keruntuhannya adalah getas (non-

daktail). Suatu kondisi yang berbahaya karena penggunaan bangunan tidak melihat adanya deformasi yang besar yang dapat dijadikan petanda bilamana struktur tersebut mau runtuh, sehingga tidak ada kesempatan untuk menghindarinya terlebih dahulu.

3. Keruntuhan seimbang (*balance*)

Keruntuhan balance terjadi jika baja dan beton tepat mencapai kuat batasnya, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) sama besar dengan regangan beton (ϵ_y). Jumlah penulangan yang menyebabkan keruntuhan balance dapat dijadikan acuan untuk menentukan apakah tulangan tarik sedikit atau tidak, sehingga sifat keruntuhan daktail atau sebaliknya.



Gambar 2.6 Jenis-jenis Keruntuhan Lentur

Keterangan Gambar 2.6

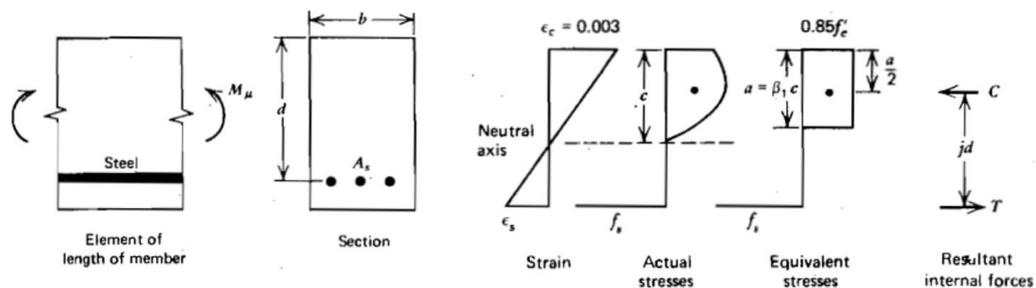
Gambar (a) Penampang balok bertulangan tunggal

Gambar (b) Distribusi regangan ultimate pada keruntuhan *under-reinforced*

Gambar (c) Distribusi regangan ultimate pada keruntuhan *over-reinforced*

Gambar (d) Distribusi regangan ultimate pada keruntuhan *balance*

2.3.1 Perhitungan Kuat Lentur Ultimate Balok



Gambar 2.7 Analisa Penampang Balok Bertulangan Tunggal

Sumber: R. Park and T. Paulay, 1975

Pada gambar di atas, gaya tekan pada beton (C_c) adalah :

$$C_c = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b \quad (2-1)$$

Dan gaya tarik pada baja (T) adalah :

$$T = A_s \cdot F_y \quad (2-2)$$

Keseimbangan gaya horizontal (gambar d)

$$\sum H = 0$$

$$T = C_c$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f'c \cdot a \cdot b$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'c \cdot b}$$

Besar Momen Nominal Balok Bertulangan Tunggal

$$M_n = C_c \times Z \quad (2-4)$$

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2-5)$$

Momen ultimate (M_u) yang dapat dipikul oleh balok adalah :

$$M_u < \phi \cdot M_n \quad (2-6)$$

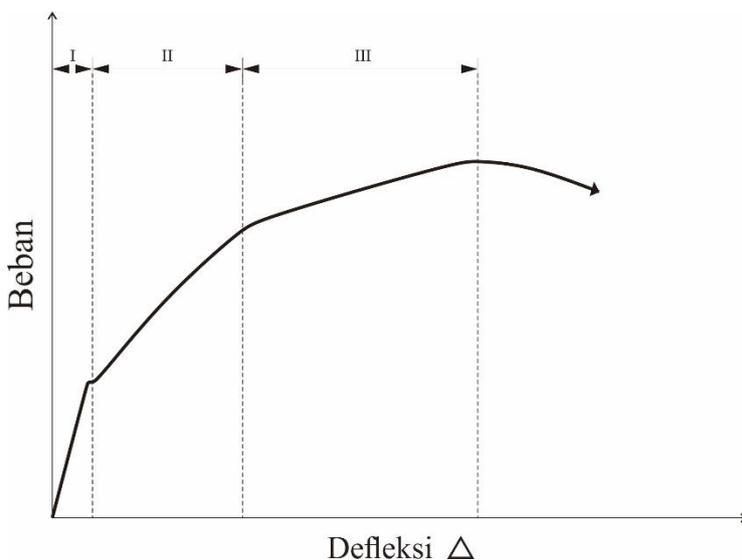
$$M_u = 0,8 \times M_n \quad (2-7)$$

2.4 Defleksi (Lendutan)

Struktur beton bertulang didesain untuk memenuhi kriteria keamanan (safety) dan kemampuan layan (serviceability). Untuk memenuhi kriteria kemampuan layan maka besarnya retak dan lendutan struktur pada kondisi beban kerja harus dapat diestimasi dan memenuhi kriteria tertentu. Sedangkan untuk memenuhi kriteria keamanan maka struktur harus didesain mempunyai suatu angka keamanan terhadap beban runtuh, karena itu perkiraan besarnya beban runtuh (batas) sangat penting. Selain nilai absolut beban yang menyebabkan keruntuhan, maka perilaku struktur saat runtuh juga perlu diketahui, apakah bersifat daktail (mengalami deformasi besar sebelum runtuh), atau tiba-tiba (non-daktail).

Balok adalah batang yang dominan memikul beban-beban yang bekerja arah transversal. Dengan kondisi ini balok akan mengalami deformasi yang berupa lengkungan atau lenturan yang menimbulkan tegangan dan regangan. Suatu balok dengan sumbu longitudinal lurus dibebani oleh gaya-gaya lateral, maka sumbu tersebut akan terdeformasi menjadi suatu lengkungan, yang disebut kurva defleksi balok. Sumbu sebuah balok akan berdefleksi dari kedudukannya semula apabila berada dibawah pengaruh gaya terpakai. Defleksi (lenturan) diukur dari permukaan netral awal ke permukaan netral setelah balok mengalami deformasi. Karena balok biasanya horizontal, maka defleksi merupakan penyimpangan vertikal.

Prilaku hubungan beban dan defleksi pada balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear. Bentuk kurva trilinear beban lendutan pada balok beton bertulang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan beban-lendutan struktur beton

Sumber: Nawy E.G, 2010

Daerah I : Taraf praretak, dimana batang-batang strukturalnya bebas retak

Daerah II : Taraf pascaretak, dimana batang-batang strukturalnya mengalami retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya.

Daerah III : Taraf pasca-serviceability, dimana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan leleh.

Keterangan berikut merupakan penjelasan dari Gambar 2.8 :

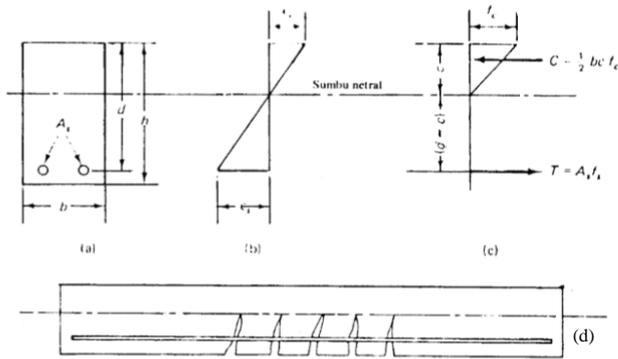
a) Taraf Praretak : Daerah I

Segmen praretak dari kurva beban defleksi pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok dalam daerah ini lebih kecil daripada kekuatan tariknya akibat lentur, atau lebih kecil dari modulus rupture f_r beton. Kekakuan lentur EI balok dapat diestimasi menggunakan modulus Young E_c dari beton, momen inersia penampang beton bertulang tak retak.

b) Taraf Beban Pascaretak: Daerah II

Daerah praretak diakhiri dengan mulainya retak pertama dan mulai bergerak menuju daerah II pada diagram beban defleksi, hampir semua balok terletak pada tengah bentang pada saat beban kerja. Suatu balok dapat mengalami berbagai taraf keretakan di sepanjang bentangnya sesuai dengan taraf tegangan dan defleksi pada masing – masing bagianya. Dengan demikian, untuk suatu balok di atas tumpuan sederhana, retak akan semakin lebar dan semakin dalam pada lapangan, sedangkan pada tumpuannya akan terjadi retak minor yang tidak lebar

Apabila sudah terjadi retak lentur, kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti kekuatan lentur penampangnya sudah berkurang sehingga kurva beban defleksi di daerah ini akan semakin landai dibandingkan pada saat praretak. Semakin besar retaknya, akan semakin berkurang kekakuannya hingga mencapai suatu harga yang berupa *lower-bound* (batas bawah) sehubungan dengan momen inersia penampang retak. Pada saat mencapai kedalaman limit beban retak kerja, kontribusi beban tarik terhadap kekakuan dapat diabaikan. Momen inesia penampang retak disebut I_{cr} dapat dihitung dari prinsip – prinsip dasar mekanik.



Gambar 2.9 Distribusi tegangan dan regangan pada penampang beton bertulang yang retak dan transformasinya : (a) penampang melintang; (b) regangan; (c) tegangan elastis dan gaya; (d) beton retak sebelum terjadinya keruntuhan lentur.

Sumber : Nawy E.G, 2010

c) Taraf Beban Pasca-serviceability: Daerah III

Diagram beban lendutan pada Gambar 2.8 pada daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekakuan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar di sepanjang bentang. Jika bebannya terus-menerus bertambah, maka regangan ϵ_s tulangan pada sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan lelehnya ϵ_y , tanpa adanya regangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara structural. Balok ini terus menerus mengalami defleksi tanpa adanya tambahan beban, dan retaknya semakin terbuka sehingga garis netralnya terus mendekati serat tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang dapat mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya *rupture* (Nawy, E.G, 2010)

Defleksi yang diijinkan pada sistem struktur sangat bergantung pada besarnya defleksi yang masih dapat ditahan oleh komponen-komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estetis dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi. Dapat diterima atau tidaknya besar defleksi merupakan fungsi dari faktor-faktor seperti jenis bangunan, digunakan atau tidak partisi, ada atau tidaknya langit-langit, ataupun kepekaan peralatan atau sistem mesin yang ditumpu oleh lantai tersebut. Karena pembatasan defleksi harus ada untuk suatu taraf beban kerja, maka struktur-struktur yang dirancang secara konservatif yaitu tegangan beton dan baja cukup kecil, pada umumnya tidak mempunyai masalah dalam hal defleksi. Akan tetapi struktur-struktur pada masa sekarang dirancang

dengan menggunakan prosedur kekuatan batas (ultimate), yaitu dengan memanfaatkan kekuatan tinggi baja dengan betonnya. Dengan demikian akan diperoleh elemen-elemen struktur yang semakin langsing, dan dalam hal demikian defleksi sesaat maupun jangka panjang sangat perlu dikontrol.

Pada SNI 03-2847-2013 tabel 9.5 dicantumkan mengenai tebal minimum balok sebagai fungsi dari panjang bentang. Terlihat disini bahwa untuk balok yang tidak memikul atau tidak dihubungkan dengan konstruksi yang mungkin rusak akibat defleksi besar, tidak diperlukan perhitungan defleksi. Defleksi-defleksi lainnya harus dihitung dan dikontrol dengan menggunakan tabel 9.6. apabila tebal total balok kurang dari yang diperlukan pada tabel, perancang harus membuktikan bahwa defleksi baloknya cukup memberikn *serviceability* yang memadai, dengan memberikan perhitungan rinci mengenai defleksi sesaat dan defleksi jangka panjangnya.

Tabel 2.4
Lendutan maksimum yang diijinkan

Komponen struktur	Tebal minimum, h			
	Tertumpu sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
	Komponen struktur tidak menumpu atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan yang besar			
Pelat masif satu-arah	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Balok atau pelat rusuk satu-arah	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$
CATATAN: Panjang bentang dalam mm. Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal dan tulangan tulangan Mutu 420 MPa. Untuk kondisi lain, nilai di atas harus dimodifikasikan sebagai berikut: (a) Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis (<i>equilibrium density</i>), w_c , di antara 1440 sampai 1840 kg/m ³ , nilai tadi harus dikalikan dengan $(1,65 - 0,0003w_c)$ tetapi tidak kurang dari 1,09. (b) Untuk f_y selain 420 MPa, nilainya harus dikalikan dengan $(0,4 + f_y/700)$.				

Sumber: SNI 03-2847-2013

Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/180^*$
Lantai yang tidak menumpu atau tidak disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Lendutan seketika akibat beban hidup L	$l/360$
Jenis komponen struktur	Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen nonstruktural (jumlah dari lendutan jangka panjang, akibat semua beban tetap yang bekerja, dan lendutan seketika, akibat penambahan beban hidup) [†]	$l/480^{\ddagger}$
Konstruksi atap atau lantai yang menumpu atau disatukan dengan komponen nonstruktural yang mungkin tidak akan rusak oleh lendutan yang besar.		$l/240^{\S}$
<p>*Batasan ini tidak dimaksudkan untuk mencegah kemungkinan penggenangan air. Kemungkinan penggenangan air harus diperiksa dengan melakukan perhitungan lendutan, termasuk lendutan tambahan akibat adanya penggenangan air tersebut, dan mempertimbangkan pengaruh jangka panjang dari beban yang selalu bekerja, lawan lendut (<i>camber</i>), toleransi konstruksi, dan keandalan sistem drainase.</p> <p>[†]Lendutan jangka panjang harus dihitung berdasarkan ketentuan 9.5.2.5 atau 9.5.4.3, tetapi boleh dikurangi dengan nilai lendutan yang terjadi sebelum penambahan komponen non-struktur. Besarnya nilai lendutan ini harus ditentukan berdasarkan data teknis yang dapat diterima berkenaan dengan karakteristik hubungan waktu dan lendutan dari komponen struktur yang serupa dengan komponen struktur yang ditinjau.</p> <p>[‡]Batas lendutan boleh dilampaui bila langkah pencegahan kerusakan terhadap komponen yang ditumpu atau yang disatukan telah dilakukan.</p> <p>[§]Batas lendutan tidak boleh lebih besar dari toleransi yang disediakan untuk komponen non-struktur. Batasan ini boleh dilampaui bila ada lawan lendut yang disediakan sedemikian hingga lendutan total dikurangi lawan lendut tidak melebihi batas lendutan yang ada.</p>		

Sumber: SNI 03-2847-2013

Defleksi batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan, atau kondisi-kondisi ujungnya (seperti tumpuan sederhana atau ada tahanan karena kesinambungan batang), jenis pembebanan (beban terpusat ataukah beban terdistribusi), dan kekakuan lentur EI dari elemen.

Persamaan umum defleksi maksimum Δ_{maks} pada balok elastis dapat diperoleh dari prinsip dasar mekanika (Nawy, E.G, 2010), yaitu:

$$\Delta_{maks} = K \frac{W l_n^3}{48EI_c}$$

Dimana W = beban total pada bentang

l_n = panjang bentang bersih

E = modulus beton

I_c = momen inersia penampang

K = suatu faktor yang bergantung pada derajat kekakuan tumpuan.

Dapat juga dinyatakan dalam momen lentur sehingga defleksi pada suatu titik pada balok adalah:

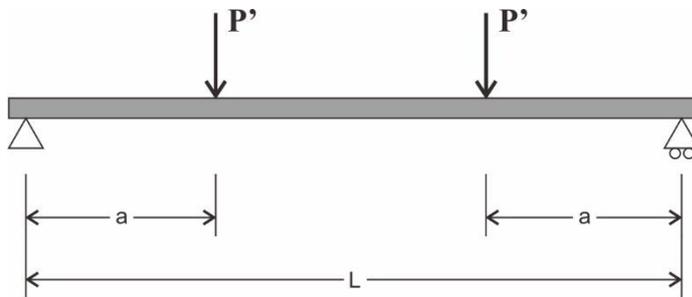
$$\Delta = k \frac{ML^2}{E_c I_e}$$

Dimana k = suatu faktor yang bergantung pada kekakuan tumpuan dan kondisi pembebanan

I_e = Momen inersia efektif

M = Momen yang bekerja pada penampang

Kondisi Pembebanan pada saat Pengujian



Gambar 2.10 Pembebanan Balok dengan beban P'

Defleksi batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan, atau kondisi ujungnya, jenis pembebanan, dan kekakuan lentur dari elemen. Pada penelitian kali ini digunakan tumpuan sendi-rol dan menggunakan beban terpusat sebesar P yang berada di tengah bentang kemudian ditransfer ke penyalur beban sehingga terbagi menjadi 2 seperti pada Gambar 2.11. Lendutan maksimum (Δ_{maks}) yang terjadi dapat dihitung sebagai berikut: (Nawy, E.G, 2010)

$$\Delta_{maks} = \frac{P' a}{24 E_c I_{gt}} (3L^2 - 4a^2)$$

Keterangan :

P' = $\frac{1}{2}$ dari beban P (Kg)

L = Panjang bentang (cm)

a = Jarak dari tumpuan ke P' (cm)

E_c = Modulus Elastisitas beton (Kg/cm²)

I_{gt} = Momen inersia penampang transformasi (cm⁴)

$$I_{gt} = \frac{1}{12} bh^3 + bh \left(y - \frac{h}{2} \right)^2 + (n - 1)As(d - y)^2$$

Keterangan:

y = kedalaman sumbu pusat gravitasi (cm)

$$= \frac{\frac{bh^2}{2} + (n-1)As.d}{bh + (n-1)As}$$

b = Lebar balok (cm)

h = Tinggi balok (cm)

n = Rasio modular (E_s/E_c)

E_c = Modulus Elastisitas beton (Mpa)

$$= 4700 \sqrt{f'_c}$$

E_s = Modulus Elastisitas besi (Mpa)

$$= 200000 \text{ Mpa}$$

d = Kedalaman balok diukur dari serat tekan terluar ke pusat baja (cm)

As = Luas tulangan (cm^2)

2.5 Perilaku Lendutan Balok Bertulang

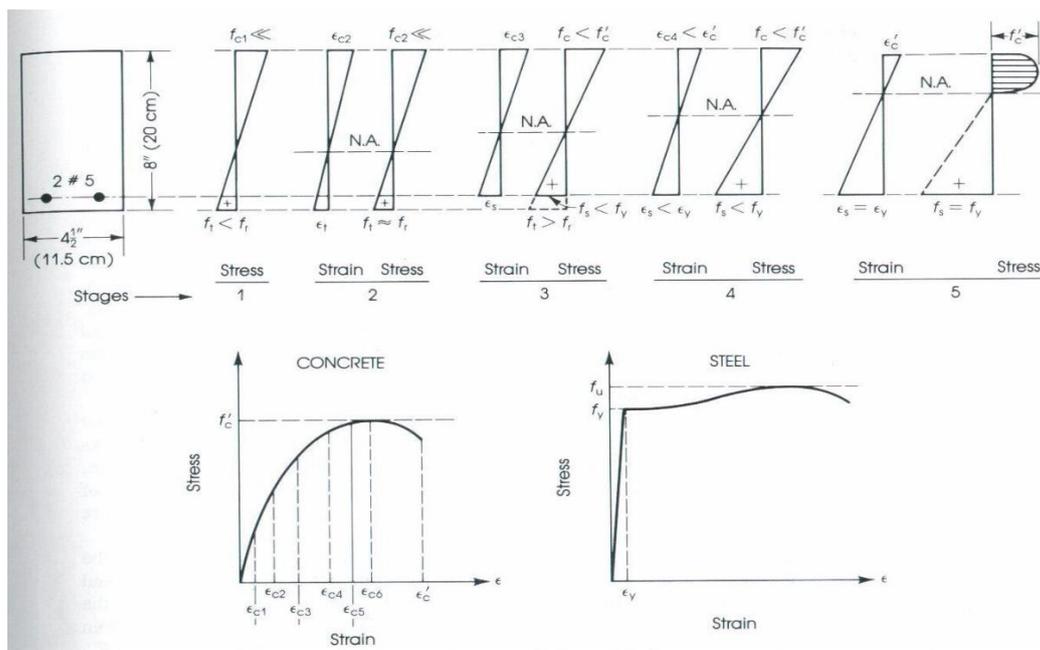
Lentur pada beton bertulang terjadi akibat respon adanya beban eksternal maupun beban sendiri beton yang mengakibatkan adanya regangan pada beton, dengan detail pada tumpuan sederhana serat bawah beton mengalami tarik dan serat atas beton bertulang mengalami tekan. Jika beban ditambah terus menerus maka pada balok akan mengalami deformasi pada penampangnya sehingga mengakibatkan regangan yang terus menambah sehingga mengakibatkan material mengalami sendi plastis dan akan mengalami retakan – retakan. Jika beban terus bertambah retakan akan pada beton akan terus terjadi diikuti dengan regangan yang terjadi pada baja, dan jika telah melebihi kapasitas maksimum balok akan mengalami kegagalan.

Tegangan dan regangan lentur merupakan hasil dari adanya momen lentur. Tegangan ini hampir selalu menentukan deformasi 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 fondasi. Setelah itu faktor – faktor lain seperti kapasitas geser, deflesi, retak dan panjang penyaluran tulangan dianalisis sampai memenuhi persyaratan. Jika suatu balok terbuat dari material yang elastis linier, isotropis dan homogen, maka tegangan lentur maksimumnya dapat diperoleh dengan rumus lentur balok yang terkenal, yaitu $f = Mc/I$.

Pada keadaan beban batas, balok beton bertulang bukanlah material yang homogen, juga tidak elastis sehingga rumus lentur balok tersebut tidak dapat digunakan untuk menghitung tegangannya. Akan tetapi prinsip – prinsip dasar mengenai teori lentur masih dapat digunakan pada analisis penampang melintang balok beton bertulang (Nawy, 2010).

Asumsi – asumsi yang digunakan dalam menetapkan perilaku penampang balok beton bertulang yang terlentur adalah sebagai berikut :

1. Distribusi regangan pada penampang balok dianggap linear, dimana prinsip ini sesuai dengan hukum Bernoulli dimana penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur. Banyak penelitian pada beton bertulang mengindikasikan jika pengasumsian ini adalah mendekati kenyataan pada semua tahapan dari pembebanan hingga balok tersebut hancur, dengan syarat lekatan antara tulangan dan beton bekerja dengan baik.
2. Regangan pada baja dan beton disekitarnya sama sebelum terjadi retak pada beton atau leleh pada baja.
3. Beton lemah terhadap tarik, beton akan retak ketika kuat tarik penampang melebihi kuat tarik pada beton, yaitu biasanya kekuatannya adalah sebesar 10% dari kekuatan tekan silinder. Akibatnya bagian beton yang mengalami tarik nilai kuat tariknya dianggap tidak digunakan atau dengan kata lain diabaikan dalam suatu perencanaan. Sehingga pada balok murni tegangan tarik ditahan oleh tulangan tarik.



Gambar 2.11 Perilaku Balok Bertulang Awal Hingga Hancur

Berikut ini adalah detail perilaku lendutan balok secara detail ketika diberi beban :

1. Pada tahap pertama balok belum diberi beban eksternal, artinya pada balok masih menahan beban sendirinya, sehingga pada tahap ini masih belum terjadi retak pada beton. Artinya adalah kuat tarik penampang masih lebih kecil dibandingkan kuat tarik beton ($f_t < f_r$).
2. Pada tahap kedua balok diberi beban hingga menyebabkan kuat tarik penampang serat bawah sama dengan kuat tarik pada beton, hal ini menyebabkan terjadinya sendi plastis pada beton, dan membuat retak awal terjadi pada beton serat bagian bawah ($f_t = f_r$).
3. Pada tahap ketiga beban ditambahkan hingga menyebabkan kuat tarik penampang melebihi kuat tarik pada beton, mulai terjadi retak pada beton bagian serat bawah akibat efek tarik maksimal terjadi pada bagian beton serat bawah. Pada tahap ini tulangan tarik mulai menahan secara penuh tegangan tarik yang terjadi namun kuat tarik baja masih jauh lebih besar dibanding tegangan tarik yang terjadi pada penampang ($f_s > f_t > f_r$). Hal ini juga membuat garis netral pada penampang naik akibat hilangnya kuat tarik yang ditahan oleh beton bagian bawah tulangan.
4. Pada tahap ini balok beton bertulang ditambah lagi bebannya hingga mengakibatkan kekuatan tarik penampang melebihi leleh baja bagian serat tarik, hal ini menyebabkan kuat tarik pada baja mengalami daerah plastisitas, hingga menyebabkan garis netral pada penampang kembali naik ($f_s < f_t$).
5. Beban terus ditambah hingga garis netral terus naik, hingga akhirnya beton bagian daerah tekan telah mengalami masa f_c' / kuat tekan silinder 28 hari, hal ini menyebabkan balok hancur ($f_s < f_t$; $f_c > f_c'$).

2.6 Hasil Penelitian Sebelumnya

Berikut ini adalah hasil penelitian yang berkaitan yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya :

1. Jurnal berjudul “ *Recyclability of waste marble in concrete production*” yang ditulis oleh *Hasan Sahan Arel dari faculty of architecture, Izmir university, Gursel Aksel Bulvan, Turkey*. Pada penelitian ini menjelaskan penggantian semen dengan limbah marmer dan menggunakan limbah marmer juga sebagai agregat halus. Hasil yang didapatkan adalah jumlah serbuk marmer yang digunakan sebagai agregat halus membuat workability dari beton menurun, namun bubuk ini berkontribusi pada

kekuatan beton karena serbuk marmer mengandung CaCO_3 dan SiO_2 sehingga membuat kuat tekan meningkat. Sementara potongan marmer yang digunakan sebagai agregat kasar membuat workability dan sifat mekanik beton meningkat. Hasil penelitian secara detail adalah sebagai berikut :

- Penggantian semen dengan kadar 5 – 10% debu marmer dapat meningkatkan sifat mekanik beton, dan mengurangi emisi gas CO_2 sebesar 12%.
 - Pada penggantian terhadap agregat kasar dapat membuat rasio air semen menurun, hal ini membuat kuat tekan beton baik.
 - Pada agregat halus pada penggantian asgregat halus ke marmer pada rasio 50% dan 75% membuat kuat tekan naik antara 20-26% dan kuat tariknya naik antara 10-15%.
2. Jurnal berjudul “*Use of waste marble aggregate in concrete*” yang ditulis oleh *H. Hebhoub, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, E. Ghorbel* dari *faculty of architecture, Material and geotechnical laboratory, Univesity of Skikda, Algeria*. Pada penelitian ini bertujuan menunjukkan kemungkinan penggunaan limbah marmer sebagai pengganti dari agregat alami dalam produksi beton. Pada penelitian ini dilakukan dengan 3 cara: yaitu marmer sebagai substitusi agregat kasar, marmer sebagai substitusi agregat kasar dan marmer sebagai substitusi agregat kasar dan halus dengan rasio penggantian adalah sebesar 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Hasil penelitian secara detail adalah sebagai berikut :
- Jika dilihat dari 3 aspek substitusi material yang ada didapatkan hasil kuat tekan
 - a. pada substitusi agregat halus terdapat marmer mendapatkan kuat tekan maksimum pada kadar penggantian 50% adalah sebesar 23,65 MPa.
 - b. Pada substitusi agregat dengan penggantian agregat kasar terhadap marmer mendapatkan kuat tekan maksimum pada kadar 75% adalah sebesar 25,08 MPa.
 - c. Pada substitusi agregat halus dan agregat kasar terhadap marmer akan menghasilkan kuuat tekan maksimum pada kadar 25% yaitu sebesar 22,2 MPa.
3. Jurnal berjudul “ Pengaruh Penggunaan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton Terhadap Modulus Elastisitas Beton” yang ditulis oleh Abdullah Ghyats dari Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya. Pada penelitian ini menjelaskan *onyx* yang digunakan sebagai pengganti agregat kasar pada beton, dimana FAS yang digunakan dibuat berbeda yaitu 0,4 ; 0,5 ; dan 0,6 dari penelitian ini didapatkan penjelasan jika penggantian agregat kasar dengan *onyx*

membuat modulus elastisitas beton meningkat sebesar 38,59% pada FAS 0,4 pada beton yang berumur 28 hari dibandingkan dengan beton dengan agregat normal.

4. Dari beberapa jurnal tentang beton yang berhubungan dengan marmer dapat dirangkum hasilnya sebagai berikut :

Tabel 2.5
Beberapa Contoh Penelitian Lain Yang Berkaitan Dengan Penelitian Ini Yang Dihimpun Dari Jurnal (Arel, 2016).

Research by	Compressive strength	Splitting tensile strength	Workability	UPV	E_{cm}	Flexural strength	Suggested repl. ratio
Wu et al. (2001)	Inc. 28–77%	Inc. 49–80%	–	–	Inc. 8–16%	Dec. 12–16%	As Coarse Aggregate (results better than 0.44 and 0.55 W/C ratios)
Binici et al. (2007)	Inc. 71%	Inc.	Dec.	–	–	–	15% with sand (as fine aggregate)
Binici et al. (2008)	Inc. 55%	Inc. 57%	–	–	–	Inc. 64%	As coarse aggregate
Topçu et al. (2007)	Dec. about 50%	Dec. about 47%	–	–	–	–	40% with Cement
Rana et al. (2015)	Dec. 43%	–	–	–	–	Dec. 4.6%	Marble slurry 5% with cement
Tennich et al. (2015)	Inc. 42.7%	Inc. 41%	Dec.	Dec.	Dec.	–	200 kg/m ³ (as filler) (Çimentonun %75'i kadar)
Rodrigues et al. (2015)	Dec. 33.9%	Dec. 30.9%	Dec.	Dec. 4.4%	Dec. 10%	–	5–10% with Cement
Hebhoub et al. (2011)	Inc. 26.9%	Inc. 11%	Dec.	–	–	–	25% with Sand
Omar et al. (2012)	Inc. 22%	Inc. 10%	–	–	Inc. 1.2–%5.1	–	15% with Sand
Aliabdo et al. (2014)	Inc. 22%	Inc. 15%	–	Dec. 1–3%	–	–	10% with Sand and low w/c
Corinaldesi et al. (2010)	Dec. 10–20%	Dec.	Dec.	–	–	–	10% with Sand and low w/c
Gesoglu et al. (2012)	Dec. 13.46%	Dec. 6%	–	–	–	–	5–10% with Cement
Ergun (2011)	Inc. 12%	–	Dec.	–	–	Inc. %5	5% with Cement
Uysal and Yilmaz (2011)	Dec. 11.3% (at 400 days)	–	Inc.	–	Dec. 7.5%	–	10% with cement
Demirel (2010)	Inc. 9.67%	–	–	Inc. 10%	Inc. 25%	–	100% with sand (as fine aggregate)
Hameed and Sekar (2009)	Inc. 6.49–9.49%	Inc. 14.62–8.66%	Inc.	–	–	–	50% with sand and (supplemental 50% rock dust)
Monica and Dhoka (2013)	Inc. 7.7%	Inc. 25%	Dec.	–	–	–	50% with fine aggregate (supplemental 50% quarry dust)
Uysal and Sumer (2011)	Dec. 7.1% (at 400 days)	–	Inc.	Dec. 1%	–	–	10% with Sand and low w/c

UPV = ultrasonic pulse velocity; E_{cm} = modulus of elasticity; – = no experiment; Inc. = increase, Dec. = decrease.

5. Beta Taufiq Raya (2016). Meneliti tentang Pengaruh Penggunaan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Lentur Beton didapatkan variasi FAS berpengaruh pada kuat lentur balok. Dapat terlihat beton dengan menggunakan agregat kasar batu *Onyx* FAS 0,4 memiliki kuat lentur rata-rata 5,351 Mpa dan 5,092 untuk agregat kerikil dengan selisih 4,840%. FAS 0,5 agregat kasar batu *Onyx* memiliki kuat lentur rata-rata 4,157 Mpa dan 4,551 untuk agregat kerikil dan 4,551 Mpa dengan selisih 8,657%. FAS 0,6 agregat kasar batu *Onyx* memiliki kuat lentur rata-rata 3,128 Mpa dan 3,278 Mpa untuk agregat kerikil dengan selisih 4,795%. Dan FAS yang paling optimum pada penelitian ini adalah FAS 0,4.
6. Karisa Ratih Natalia (2016). Meneliti tentang Struktur Mikro Pada Beton Dengan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar didapatkan Pengaruh yang ditimbulkan pada sifat fisis beton dengan menggunakan limbah batu *Onyx* sebagai pengganti agregat kasar tidak terlalu berbeda apabila dibandingkan dengan beton normal.

7. Aulia Nurul Annisa (2016). Meneliti tentang Pengaruh Penggunaan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tarik Belah Beton didapatkan Perbandingan kuat tarik belah beton dengan campuran limbah batu *Onyx* dibandingkan dengan beton normal pada masing-masing fas berbeda prosentasenya yaitu sebesar lebih kecil 17.48% pada FAS 0.4, lebih kecil 7.28% pada FAS 0.5 dan lebih besar 9.09% pada FAS 0.6.

2.7 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan tinjauan yang terdapat dalam penelitian sebelumnya maka penulis dapat mengambil hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Kuat tekan beton antara agregat normal berbeda dengan agregat batu *onyx*.
2. Beton dengan agregat limbah batu *onyx* dapat mempengaruhi defleksi (lendutan) balok beton bertulang.
3. Defleksi (lendutan) balok bertulang dengan agregat *onyx* akan berbeda dengan Defleksi balok bertulang agregat normal.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)