

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton adalah campuran pasir, kerikil, batu hancur, atau agregat lainnya yang dicampurkan menjadi satu seperti kerikil dengan pasta semen dan air. Beberapa campuran ditambahkan untuk mengubah karakteristik beton tertentu seperti kemampuan kerja, daya tahan, dan waktu pengerasannya.

Agar dihasilkan kuat tekan beton sesuai rencana diperlukan mix desain untuk menentukan jumlah susunan bahan yang dibutuhkan. Selain perbandingan bahan, kekuatan beton ditentukan oleh kepadatan campuran bahan penyusun beton tersebut. Semakin kecil rongga yang dihasilkan dalam campuran beton maka semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan (Tri Mulyo, 2005)

Sebagai salah satu unsur struktur utama beton memiliki kelebihan dan kekurangan antara lain sebagai berikut:

Kelebihan Beton:

1. Beton memiliki kemampuan untuk menahan gaya tekan dengan baik, serta memiliki sifat tahan terhadap korosi dan pembusukan yang dikarenakan kondisi lingkungan.
2. Beton segar dapat dengan dicetak dan dibentuk dengan mudah sesuai keinginan. Cetakan dapat digunakan berulang kali sehingga lebih ekonomis.
3. Beton tahan aus serta tahan bakar, hal tersebut membuat perawatan lebih murah.

Kekurangan Beton:

1. Beton dianggap tidak mampu untuk menahan gaya tarik, sehingga mudah mengalami retak. Untuk mengantisipasi hal tersebut beton membutuhkan baja untuk menahan gaya tarik.
2. Beton dapat menyusut dan juga mengembang apabila terjadi perubahan suhu, maka perlu dibuat dilatasi (*expansi join*) mencegah terjadinya retakan – retakan.
3. Agar beton kedap air, pengerjaan beton harus secara teliti.

2.2 Bahan Dasar Penyusun 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.

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 (Mulyono, 2004 : 19).

2.2.1 Semen

Semen dipakai sebagai bahan pengikat hidrolik untuk pembuatan beton. Pengertian semen sebagai pengikat hidrolik adalah :

1. Semen bereaksi dengan air dan membentuk suatu batuan massa,
2. Suatu produksi keras (batuan-semen) yang kedap air.

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.

ASTM C-15 menjelaskan, semen portland didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan dengan klinker yang terdiri dari kalsium silikat hidrolik, yang umumnya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan, yang digiling bersama-sama bahan utamanya. Bahan utama penyusun semen adalah kapur (CaO), silica (SiO_3), dan alumina (Al_2O_3).

Dalam SNI 15-0302-2004 menjelaskan, semen portland pozolan merupakan suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dengan pozolan halus, yang di produksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozolan 6 % sampai dengan 40 % massa semen portland pozolan. Pozolan sendiri merupakan bahan yang mengandung silika atau senyawanya dan alumina, yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen, akan tetapi dalam bentuknya yang halus dan dengan adanya air, senyawa tersebut akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida pada suhu kamar membentuk senyawa yang mempunyai sifat seperti semen.

Jenis semen PPC :

1. Jenis IP-U yaitu semen portland pozolan yang dapat dipergunakan untuk semua tujuan pembuatan adukan beton.
2. Jenis IP-K yaitu semen portland pozolan 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 pozolan yang dapat dipergunakan untuk pembuatan beton dimana tidak disyaratkan kekuatan awal yang tinggi.
4. Jenis P-K yaitu semen portland pozolan 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. 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

2.2.2 Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat dengan besar butir dibawah 4,75 mm. Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir olahan atau gabungan dari kedua jenis pasir tersebut. Persyaratan Mutu Agregat Halus:

1. Batas gradasi agregat halus sesuai SNI 03-2834-2000 dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.1

Batasan Gradasi Agaregat Halus SNI 03-2834-2000

Lubang Ayakan (mm)	Persen bahan butiran yang lewat ayakan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
9,6	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

2. 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.
3. Berat jenis (*specific gravity*) agregat halus sesuai ASTM C-33 yaitu 1,60-3,20.
4. Absorpsi (penyerapan air) sesuai ASTM C-33 yaitu 0,2%-2,0%.
5. Spesifikasi berat volume sesuai ASTM C-33 yaitu 3%-5%.
6. Kadar lumpur agregat halus sesuai spesifikasi ASTM C-33 yaitu 0,2%-6,0%.

2.2.3 Agregat Kasar

Agregat pada umumnya terdiri dari bahan – bahan yang terdapat secara alamiah, misalnya kerikil, batu karang, pasir. Selain ini kini telah dibuat pula bahan – bahan sintetik sebagai agregat. Klasifikasi dari agregat alam dapat dipelajari melalui ilmu batuan antara lain petropologi.

Jenis Batuan :

1. Batuan endapan
2. Batuan vulkanik
3. Batuan methamorphic

Pada umumnya terbentuk akibat modifikasi dari batuan endapan dan batuan vulkanik yang dihasilkan akibat tekanan – tekanan kuat disebabkan oleh gerakan bumi disertai panas yang sangat tinggi yang menyebabkan penghancuran dan pelarutan. Jenis batuan methamorphic seperti marmer, quartzit, biasanya kuat serta padat dan merupakan bahan agregat yang baik.

Ciri khas batuan ini yaitu strukturnya terdiri dari bidang –bidang parallel yang mengandung bahan – bahan mineral bidang – bidang parallel.

Andesit adalah batuan beku vulkanik yang terdapat dipermukaan bumi yang merupakan hasil erupsi atau letusan gunung berapi baik yang masih aktif atau mati, ukuran fisiknya cukup bervariasi dari kerikil hingga bongkahan maupun massif. Batuan ini merupakan batuan menengah dengan kandungan silika 56,77%, padat, keras, kompak, mempunyai tekstur yang halus, berwarna antara abu – abu kegelapan sampai hitam dengan kandungan mineral utama adalah andesine 64%, amphibol 12%, piroksin 11%, biotit 5%, dan potasium feldspar 3%. Secara fisik batuan beku seperti granit, andesit, dan basalt memiliki berat jenis sekitar 1,6 – 2,9 dengan berat isi 1635 – 2870 kg/m³.

Agregat kasar adalah agregat dengan besar butir lebih besar dari 4,75 mm. Agregat kasar dapat berupa kerikil, batu pecah, terak tanur tiup atau beton semen – hidrolis yang dipecah. Komposisi agregat kasar pada campuran beton sekitar 60% - 70 %.

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.

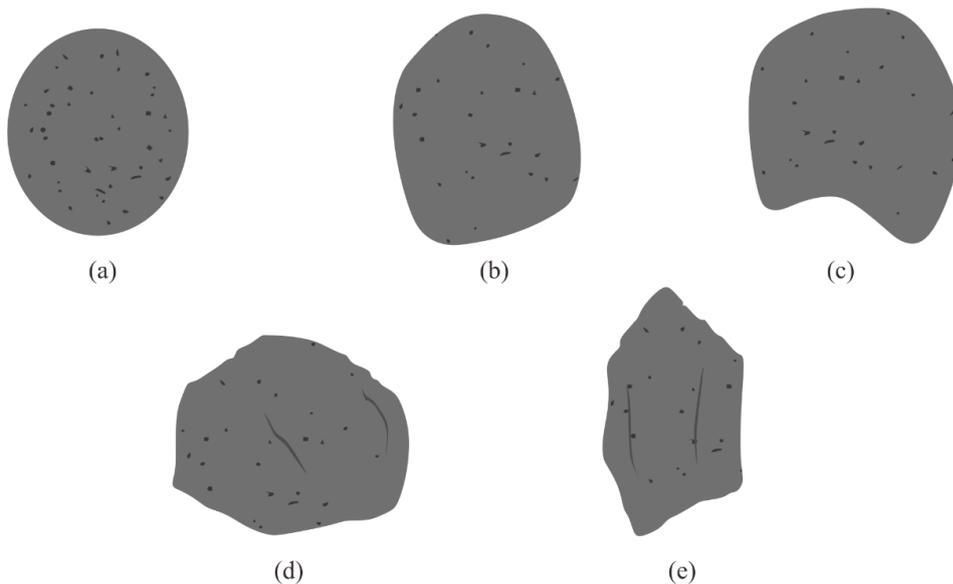
Jenis agregat kasar yang umum digunakan adalah :

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.

2.2.2.1 Tekstur dan bentuk agregat

Agregat untuk pembuatan beton memiliki ukuran dan bentuk tertentu yang sangat bervariasi. Ukuran dan bentuk dari agregat adalah satu hal yang penting dalam karakteristik agregat. Dalam hal ini terdapat istilah *roundness*, yaitu ukuran relatif besarnya sudut – sudut dari tepi agregat. *Roundness* pada umumnya dikontrol oleh kekuatan dan ketahanan dari batu induk. Dalam kasus *crushed aggregates*, bentuk dari agregat bergantung pada kondisi alam dari batu induk dan tipe penghancuran serta rasio reduksinya, yaitu rasio ukuran dari material yang dimasukkan kedalam alat penghancur dengan produk agregat yang dihasilkan. Klasifikasi dari bentuk agregat pada umumnya adalah sebagai berikut :

- *Well rounded* – bentuk asli dari batuan induk sudah tidak ada
- *Rounded* – bentuk asli batuan induk sudah hampir hilang
- *Stubrounded* – permukaan sudah halus namun bentuk asli batu induk masih tetap ada
- *Subangular* – terdapat permukaan yang halus
- *Angular* – bentuk tidak teratur



Gambar 2.1 Macam – macam bentuk agregat (a) Well rounded, (b) Rounded, (c) Stubrounded, (d) Subangular, (d) Angular

Selain dari bentuk agregat, perlu diperhatikan pula tekstur permukaan agregat. Tekstur permukaan agregat ini bergantung pada kekerasaannya, ukuran butiran, porositas dari material induknya, dan juga besarnya energi yang terjadi pada permukaan, membuat agregat lebih halus atau lebih kasar. Klasifikasi tekstur permukaan agregat ini didasarkan pada derajat apakah permukaan agregat licin atau tidak, halus atau kasar.

Bentuk dan tekstur permukaan dari agregat mempengaruhi kekuatan dari beton, dimana *flexural strength* lebih terpengaruh dibandingkan dengan *compressive strength*. Pengaruh ini didasarkan pada asumsi bahwa tekstur yang lebih kasar akan menghasilkan kekuatan adhesi yang lebih besar antar partikel dengan matriks semen. Sama halnya dengan semakin luas permukaan agregat maka semakin besar kekuatan adhesi yang dihasilkan. Namun disatu sisi, dengan digunakannya agregat yang permukaannya kasar, akan menyebabkan dibutuhkan air yang lebih banyak pada campuran beton.

2.2.2.2 Ikatan agregat

Ikatan antar agregat dan pasta semen adalah faktor penting dalam menyumbang kekuatan beton, terutama dalam kuat tariknya. Pada permukaan yang kasar, seperti pecahan batu, akan memberikan ikatan yang lebih kuat dengan pasta semen. Ikatan yang lebih baik juga didapat dari partikel yang kandungan mineralnya heterogen dan bersifat porous. Selain itu, ikatan agregat juga dipengaruhi oleh property fisik dan kimiawi dari agregat, yang berhubungan dengan komposisi mineral serta kimiawi dan kondisi elektrostatis dari permukaan agregat.

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 03-2834-2000 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%.

1. Absorpsi dan berat jenis (*specific gravity*) agregat kasar, spesifikasi berat jenis agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 1,60-3,20 dan absorpsi pada nilai 0,2-0,4%. Untuk beton mutu tinggi akan baik dengan absorpsi kurang dari 1%.
2. Berat volume agregat kasar, spesifikasi berat volume agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 1,6-1,9 .
3. Kadar air agregat kasar, spesifikasi kadar air agregat kasar sesuai ASTM C-33 yaitu 0,5%-50%.
4. Kadar lumpur agregat kasar sesuai spesifikasi ASTM C-33 yaitu 0,2%-1,0%.
5. Persentase keausan agregat kasar sesuai spesifikasi ASTM C-33 adalah 15%-50%.

2.2.4 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 terrestrial 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 (Asitya, 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 hamper 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 organis, sehingga proses pengerasan semen tidak terhambat, karena bahan organik dapat menghambat pengerasan semen.



Gambar 2.2 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. 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 :

1. Penyerapan air kurang dari 1%
2. Kekuatan tekan antara 19 – 140 Mpa, dan kekuatan tekan rata – rata 110 Mpa
3. Kekuatan lentur 6 – 15 Mpa
4. Kekuatan tarik rata – rata 4 Mpa
5. Porositas rendah dan bervariasi antara 0,3% sampai 1,2%

2.2.5 Air

Air diperlukan pada pembuatan beton untuk memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan 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.

2.2.6 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:

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 30 – 2834 – 2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.
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.*

2.3 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 :

1. Lekatan sempurna antara batang tulangan baja dengan beton keras yang membungkusnya sehingga tidak terjadi penggelinciran.
2. Beton bersifat kedap air sehingga melindungi baja dari korosi
3. Angka kecepatan muai kedua bahan hampir sama, beton sekitar 0,00001 sampai 0,000013 sedang baja 0,000012.

2.3.1 Kekuatan Beton Bertulang

Menurut SNI 03-3847-2002 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. Pada penampang beton bertulang , nilai kuat nominal bergantung pada: dimensi penampang, jumlah dan letak tulangan, mutu beton dan baja tulangan. Jadi pada dasarnya kuat nominal ini adalah hasil hitungan kekuatan yang sebenarnya dari keadaan struktur beton bertulang pada keadaan normal. Kuat nominal ini biasanya ditulis dengan simbol-simbol Mn, Vn, Tn, dan Pn dengan subscript n menunjukkan bahwa nilai-nilai :

M = Momen

V = Gaya geser

T = Torsi (momen puntir)

P = Gaya aksial (diperoleh dari beban nominal suatu struktur atau komponen struktur)

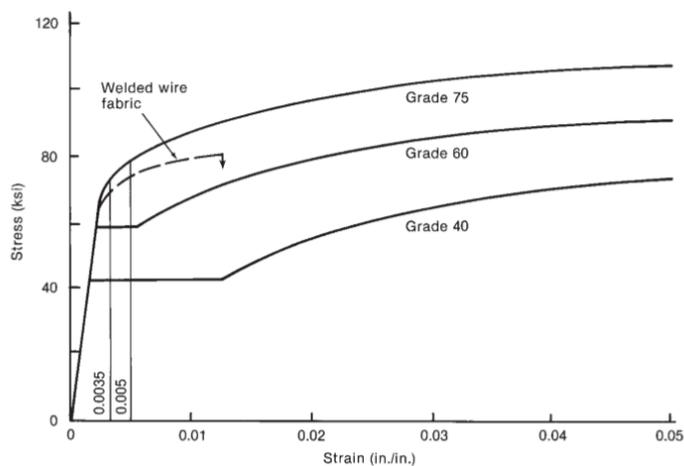
2. Kuat perlu, kuat suatu kompone struktur atau penampang yang diperlukan untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya dalam yang berkaitan dengan beban tersebut dalam suatu kombinasi seperti dalam peraturan SNI 03-3847-2002 Kuat perlu juga bisa ditulis dengan simbol-simbol Mu, Vu, Tu, dan Pu. Karena pada dasarnya kuat rencana Rr, merupakan kekuatan gaya dalam (berada di dalam struktur), sedangkan kuat perlu Ru merupakan kekuatan gaya luar (di luar struktur) yang bekerja pada struktur, maka agar perencanaan struktur dapat dijamin keamanannya harus dipenuhi syarat Kuat rencana Rr harus > kuat perlu Ru.
3. Kuat rencana, kuat nominal dikalikan dengan suatu factor reduksi kekuatan ϕ untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya yang berkaitan dengan beban tersebut dalam suatu kombinasi beban. Kuat rencana ini juga dapat ditulis dengan simbol Mr, Vr, Tr, dan Pr diperoleh dari beban rencana yang boleh bekerja pada suatu struktur atau komponen struktur.

2.3.2 Tulangan

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).



Gambar 2.3 Kurva tegangan – regangan baja

Sumber : James G. Macgregor

2.4 Balok Beton Bertulangan Tunggal

Beban-beban luar yang bekerja pada struktur akan menyebabkan lentur dan deformasi pada elemen struktur. Lentur pada balok timbul karena adanya regangan yang disebabkan oleh beban luar. Jika beban yang bekerja pada balok semakin besar maka tegangan dan regangan akan bertambah sebanding dengan kemampuan bahan berubah bentuk dan modulus elastisitas bahan sehingga melampaui kapasitasnya yang menimbulkan retak atau bertambahnya retak lentur pada balok . Bila beban semakin bertambah, akan terjadi

keruntuhan struktural balok beton, yaitu saat beton luarnya mencapai kapasitas elemen. Hal tersebut merupakan keadaan limit dari keruntuhan pada lentur.

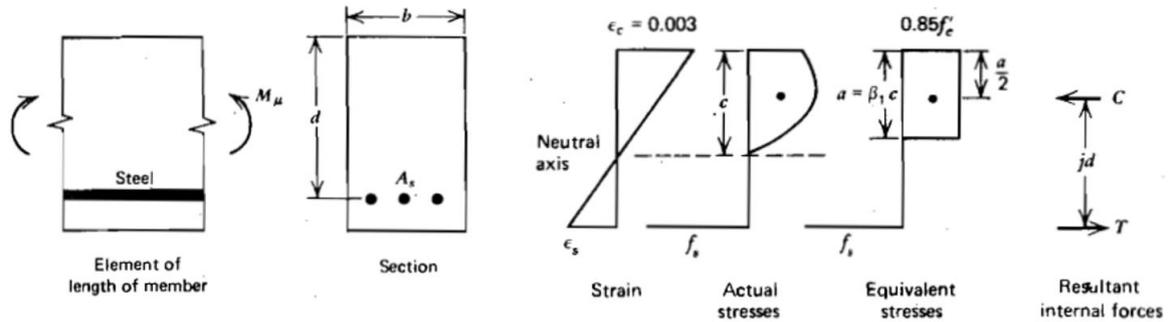
Berdasarkan keruntuhan yang dialami balok dapat dikelompokkan kedalam tiga kelompok sebagai berikut :

- 1) *Penampang Balanced*. Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan. Pada awal terjadi keruntuhan, regangan tekan yang diizinkan pada serat tepi yang tertekan adalah 0,003 in. /in. sedangkan regangan baja sama dengan regangan lelehnya, yaitu $\epsilon_y = f_y/E_c$.
- 2) *Penampang over-reinforced*. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan. Pada saat awal keruntuhan, regangan awal ϵ_s yang terjadi masih lebih kecil dari pada tegangan lelehnya, ϵ_y . Dengan demikian tegangan baja f_s juga lebih kecil dari tegangan lelehnya, ϵ_y . Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam keadaan *balanced*.
- 3) *Penampang under-reinforced*. Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja. Tulangan baja ini terus bertambah panjang dengan bertambahnya regangan diatas ϵ_y . Kondisi penampang demikian akan terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai kurang dari yang diperlukan dalam keadaan *balanced*.

Beberapa asumsi yang digunakan untuk menetapkan perilaku penampang yaitu sebagai berikut:

1. Distribusi regangan dianggap linier, asumsi berdasarkan pada hipotesis bernauli, yakni penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur
2. Regangan pada beton dan baja disekitarnya sama sebelum terjadi leleh pada baja dan retak pada beton.
3. Beton lemah terhadap tarik, beton akan mengalami retak pada taraf pembebanan kecil yakni 10% dari kekuatan tekannya. Maka dari itu bagian beton yang mengalami tarik dianggap tidak ada, sehingga dalam perhitungan analisis dan desain gaya tarik dipikul oleh oleh tulangan tarik sepenuhnya.

Kesetimbangan gaya horizontal akan terpenuhi apabila gaya tekan C pada beton dan gaya tarik T pada tulangan harus seimbang, maka $C = T$.



Gambar 2.4 Distribusi tegangan dan regangan pada penampang beton

(Sumber : R. Park, T. Paulay ,1974)

Untuk mencari nilai momen nominal penampang sebagai berikut :

Nilai β_1 diambil sama dengan 0,85 untuk beton dengan kekuatan lebih kecil dari atau sama dengan 30 MPa, dan nilai ini terus dikurangi sebesar 0,05 untuk setiap kenaikan kekuatan sebesar 7 MPa tetapi tidak boleh lebih kecil dari 0,65. Untuk beton dengan $f'_c > 30$ MPa, nilai β_1 dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{f'_c - 30}{7} \right) (0,05) \leq 0,65 \quad (2-1)$$

gaya horizontal C dan T untuk mencari a, diperoleh:

$$0,85 f'_c a b = A_s F_y \quad (2-2)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} \quad (2-3)$$

Sehingga M_n dapat dihitung dengan rumus:

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2-4)$$

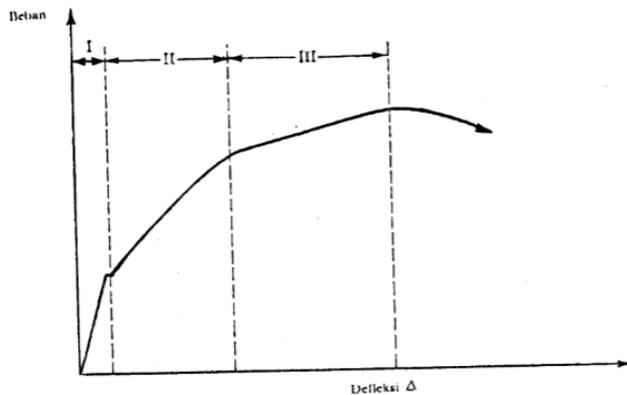
$$= A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2-5)$$

Karena Nilai T dan C sama, persamaannya juga dapat ditulis menjadi:

$$M_n = 0,85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2-6)$$

2.4.1 Perilaku Keruntuhan Balok

Perilaku balok yang dibebani hingga runtuh dinyatakan dengan kurva hubungan antara beban dengan defleksi.

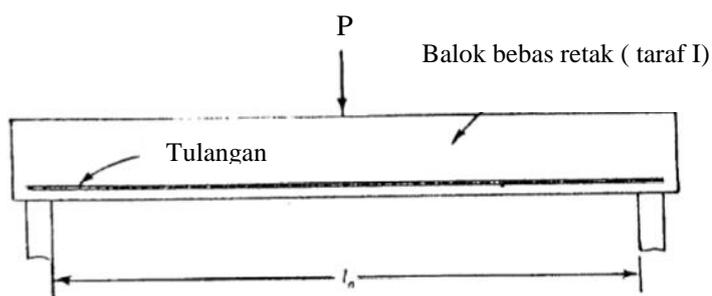


Gambar 2.5 Hubungan beban – defleksi pada balok

(Sumber : Nawy E.G, 2010)

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.



Gambar 2.6 Balok yang dibebani ditengah pada taraf praretak

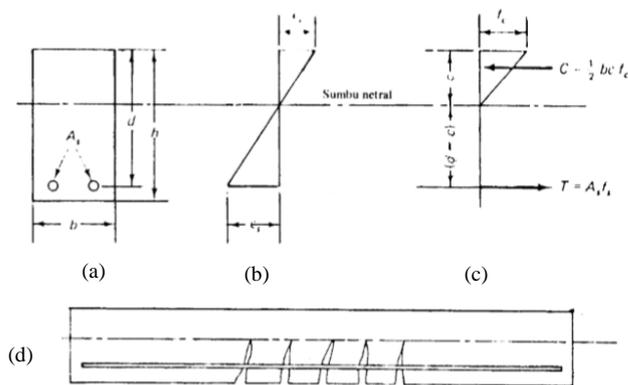
(Sumber : Nawy E.G, 2010)

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

tegang bentang pada saat beban kerja. Suatu balok dapat mengalami berbagai taraf keretakan di sepanjang bentangnya sesuai dengan taraf tegangan dan defleksi pada masing – masing bagiannya. 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 penampang 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 inersia penampang retak disebut I_{cr} dapat dihitung dari prinsip – prinsip dasar mekanik.



Gambar 2.7 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) Diagram beban lendutan pada Gambar 2.5 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)

2.4.2 Keruntuhan Akibat Geser

Pada pembebanan balok diketahui bahwa transfer beban ke tumpuan melampaui mekanisme momen lentur dan gaya geser yang terjadi secara bersamaan. Keruntuhan ini (akibat tegangan biaksial) bersifat getas dan terjadi tiba – tiba. Berbeda dengan keruntuhan lentur yang bersifat duktail, didahului dengan timbulnya lendutan besar yang dapat digunakan sebagai “pertanda”.

Keruntuhan balok beton bertulang dalam geser akan terjadi secara tiba-tiba dengan peringatan kecil, atau tanpa peringatan sebelumnya. Oleh karena itu, balok direncanakan runtuh dalam lentur akibat beban yang lebih kecil dari beban yang menyebabkan keruntuhan geser. Batang tersebut dapat retak dan melendut cukup besar jika mendapat beban lebih, tetapi tidak akan patah seperti halnya jika terjadi keruntuhan geser.

2.5 Retak

Penyebab terjadinya retak dikarenakan berbagai faktor, tetapi yang sering terjadi disebabkan oleh satu atau lebih perilaku

a. Retak akibat *plastic concrete*

Beton cenderung menetap pada bekisting pada saat berada dalam keadaan plastik. Hal ini menyebabkan sedikit penurunan pada beton segar, biasanya terjadi di setiap sisi terutama di dekat permukaan atas pada beton, dan pada posisi yang tetap. Garis retak mengikuti pengerasan yang terjadi. Beberapa retak kadang-kadang dapat diamati pada permukaan balok. Tipe retak ini bisa dihindari dengan cara desain campuran yang bagus dan dengan revibrasi serta pengecatan beton *plastic*.

b. Retak karena perubahan volume

Pengeringan susut dan tegangan termal menyebabkan perubahan volume yang akan menyebabkan tegangan tarik sehingga menyebabkan retak. Tekanan bisa muncul dalam beberapa cara. Misalnya, beton di dekat permukaan lebih cepat menyusut lebih dari beton di bagian dalam. Oleh karena itu, beton yang ada di dalam akan menahan beton luar, sehingga menyebabkan tegangan tarik terjadi di dekat permukaan, yang

dapat menyebabkan retak permukaan. Demikian pula perubahan suhu akan menyebabkan tegangan jika gerakan tidak dapat terjadi serta tak terkendali. Retak karena penyusutan dapat dikontrol dengan mengurangi dengan desain campuran yang baik (dengan menjaga kadar air yang serendah) dan dengan penguatan yang benar. Penguatan tidak akan mencegah terjadinya retak. Memang sisa penguat akan cenderung mendorong terjadinya retak, tapi tekanan susut didistribusikan oleh ikatan, dan sejumlah retak halus harus terjadi (bukan reatak yang lebar). Penguatan ini dimaksudkan agar cukup untuk mengendalikan lebar retakan karena susut dan suhu.

- c. Retak akibat tegangan langsung dan lentur akibat beban atau reaksi yang diberikan Retak dapat terjadi pada daerah yang mengalami tegangan lentur dan aksial. Tegangan semacam itu mungkin timbul dari beban atau reaksi eksternal. Retak yang tegak lurus, seperti pada kasus tegangan aksial atau lentur tanpa kekuatan geser yang signifikan lebih condong tegak lurus sumbu. Retak geser, dikenal sebagai keretakan diagonal, pada umumnya dapat dikendalikan dengan memberikan penguatan geser.

Tegangan yang disebabkan oleh beban, momen dan geser menyebabkan bermacam model kenampakan pola retak pada beton. Pola dan bentuk retak dapat membantu memperkirakan penyebab timbulnya retak, berikut merupakan macam dan penyebab retak:

1. Retak Geser

Retak geser diakibatkan beton tidak mampu menahan gaya geser, Dalam hal ini terjadi retak vertikal yang arahnya menuju pada titik beban. Pada balok yang tinggi (3 – 4 ft) jarak retak relatif lebih dekat dengan sebagian retak akan bergabung. Lebar retak di bagian tengah lebih besar daripada yang terjadi pada bagian lainnya. Retak – retak yang terjadi pada $\frac{1}{3}$ tinggi balok adalah retak lentur.

Retak yang disebabkan geser mempunyai karakteristik kenampakan yang miring.



Gambar 2.8 Retak beton akibat gaya geser

(Sumber : J.K Wildth and J.G MacGregor, 2012)

Retak – retak ini setinggi garis netral beton dan kadang – kadang juga sampai pada daerah tekan. Retak geser merupakan retak horizontal yang terjadi pada balok. Berada di daerah tumpuan retak ini juga merupakan retak yang tegak lurus dengan sengkang.

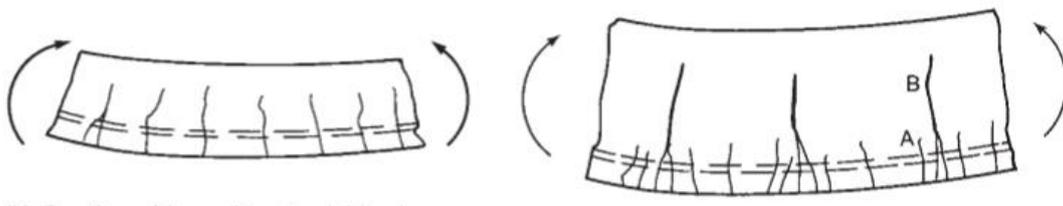
Sedangkan yang ditunjukkan pada gambar merupakan retak lentur – geser. Bermula dari serat tarik balok, retak ini diawali dengan retak lentur yang dilanjutkan oleh retak diagonal menuju ke titik pembebanan.

2. Retak Lentur

Retak lentur diakibatkan beton tidak mampu menahan momen lentur, retak yang terjadi di tengah – tengah bentang. Retak ini disebut sebagai letak lentur. Diawali dengan retak adanya rambut, retak lentur merupakan retak yang tegak lurus dengan tulangan.

Dapat kita lihat pada kedua gambar 2.9, retak maksimum yang terjadi adalah pada bentang tengah balok. Retakan pada daerah tersebut selain menyambung juga merupakan retak dengan celah yang besar.

Beton bertulang yang mengalami momen akan mengalami retak seperti gambar 2.9 berikut :



Gambar 2.9 Retak beton akibat gaya momen

(Sumber : J.K Wildth and J.G MacGregor, 2012)

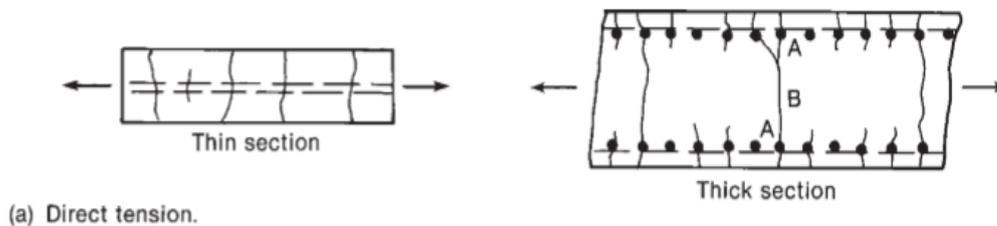
Mekanisme terjadinya retak lentur yaitu bagian – bagian konstruksi yang mengalami lentur pada umumnya memperlihatkan suatu rangkaian retak – retak lentur yang tersebar. Mekanisme ini dapat digambarkan dengan meninjau perilaku suatu bagian konstruksi yang mengalami momen merata. Suatu balok mula – mula akan bersifat elastis seluruhnya, pada saat pembebanan momen . Apabila batas regangan beton tercapai, maka akan terjadi retak, dan daerah tarik yang berdekatan tidak akan dipengaruhi lebih jauh lagi oleh gaya – gaya tarik langsung. Akan tetapi, kelengkungan balok menyebabkan tegangan – tegangan tarik langsung selanjutnya menimbulkan retak pada suatu jarak pada retak semula, untuk

mempertahankan kesetimbangan-dalam. Hal ini berturut – turut menyebabkan terjadinya retak lebih lanjut, dan proses ini akan berlanjut sampai jarak antara retak – retak tidak memungkinkan lagi timbulnya tegangan – tegangan tarik yang cukup untuk menyebabkan retak – retak selanjutnya. Retak – retak awal disebut retak primer, dan jarak rata – ratanya dalam suatu daerah momen konstan, secara percobaan telah didapat sebesar kira – kira $1,67(h - x)$ dan tidak akan dipengaruhi oleh detail tulangan.

Pola retak yang terjadi pada balok dibagi menjadi dua daerah. Daerah beton yang mengalami tekan dan daerah beton yang mengalami tarik. Pada beton *underreinforced* daerah tarik mengalami ketuntuhan terlebih dahulu. Retak lentur awal yang terjadi di daerah tarik selanjutnya retak menyebar sedikit demi sedikit ke daerah tekan. Secara umum retak awal terjadi dibawah titik beban. Setelah beban mencapai diatas 90% dari beban teoritis atau sekitar 78% dari beban runtuh, retak mulai terjadi ditengah bentang.

3. Retak Tarik

Beton yang mengalami gaya tarik akan mengalami retak sepanjang penampang melintang dengan jarak retak bervariasi antara 0,75 sampai 2 kali ketebalan beton (J.K Wildth and J.G MacGregor, 2012).



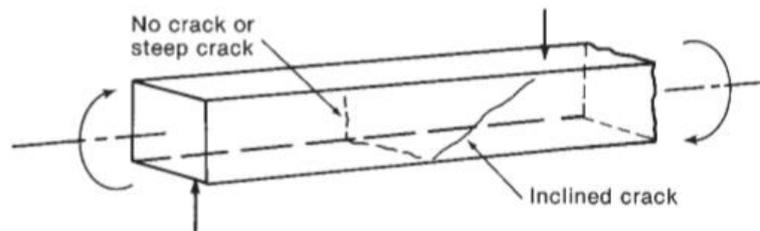
Gambar 2.10 Retak beton akibat gaya tarik

(Sumber : J.K Wildth and J.G MacGregor, 2012)

Suatu beton yang mempunyai ketebalan yang besar dengan kekuatan tulangan disetiap permukaannya akan mempunyai lebar retak permukaan yang kecil pada lapisan yang terdapat kekuatan.

4. Retak Torsi

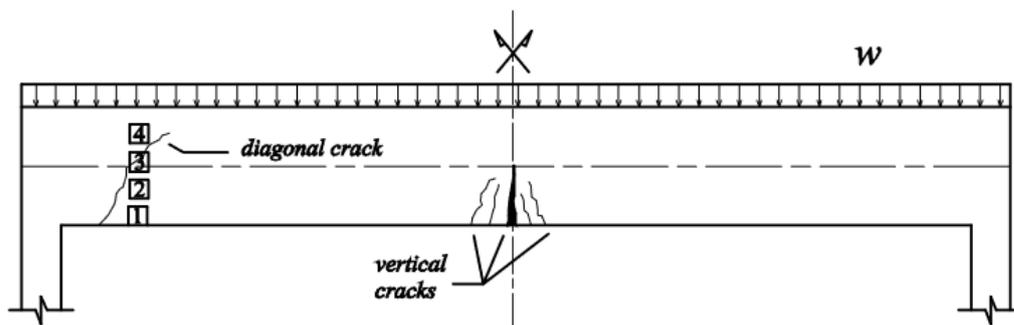
Retak akibat torsi murni akan mengelilingi beton. Pada beton normal yang juga mengalami momen dan geser keretakan cenderung kelihatan pada permukaan dimana terjadi tegangan geser yang menyebabkan penambahan torsi.



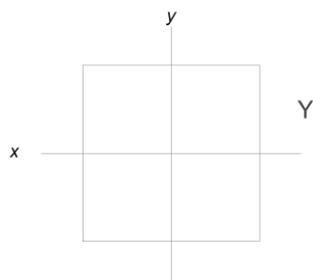
Gambar 2.11 Retak beton akibat torsi

(Sumber : J.K Wildth and J.G MacGregor, 2012)

2.6 Geser Homogen Balok Elastis



Gambar 2.12 Pembebanan balok dan arah retak



Gambar 2.13 Sumbu penampang

Tegangan normal f_x didapat dari persamaan berikut:

$$f_x = \frac{MxY}{I_x} \quad (2-7)$$

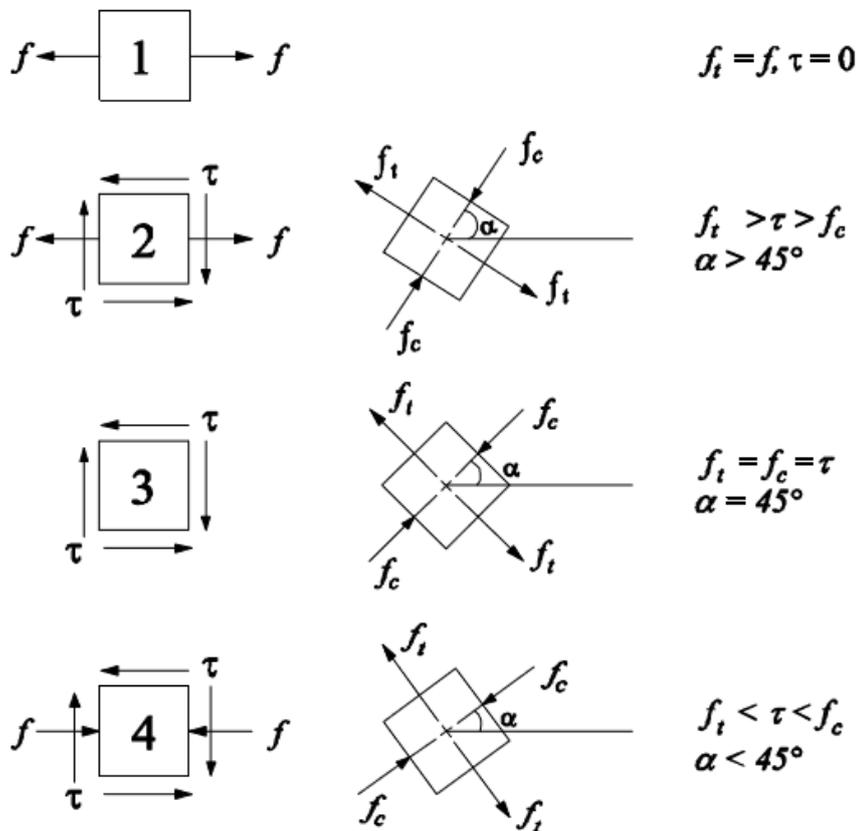
Dimana Mx adalah momen lentur dari titik yang ditinjau, y adalah jarak dari titik daerah yang ditinjau hingga sumbu netral, dan I_x adalah momen inersia penampang terhadap garis netral.

Tegangan geser t_x , didapatkan dari persamaan berikut:

$$t_x = \frac{V_x Q_x}{I_x b}$$

Dimana V_x adalah gaya geser pada titik yang ditinjau, Q_x adalah momen statis pada daerah yang terjadi tegangan geser dan serat luar dari dari garis netral, I_x adalah momen inersia penampang terhadap garis netral dan b adalah lebar penampang dimana tegangan geser ditinjau.

Untuk mengetahui pola retak, terdapat empat jarak yang berbeda dari sumbu netral menggambarkan perbedaan pola retak yang terjadi, dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 2.14 Prinsip tegangan pada elemen 1, 2, 3, dan 4

1. Elemen 1

Pada kondisi 1 hanya terjadi tegangan normal dan gaya tarik yang disebabkan oleh momen lentur. Tegangan utama berada pada arah yang sama dengan tegangan tarik normal. Dengan demikian retak terjadi pada bidang vertikal karena lemahnya beton pada daerah tarik.

2. Elemen 2

Elemen 2 berada dibawah sumbu netral terdiri dari tegangan normal tarik dan tegangan geser. Retak membentuk sudut lebih besar dari 45° terhadap sumbu horizontal. Retak terjadi pada bidang yang tegak lurus terhadap bidang dimana tegangan tarik utama terjadi.

3. Elemen 3

Elemen 3 terletak pada garis netral dimana hanya terjadi tegangan geser. Retak yang terjadi membentuk sudut 45° terhadap sumbu horizontal. Dengan demikian retak terjadi pada bidang yang tegak lurus terhadap tegangan tarik utama.

4. Elemen 4

Elemen 4 terletak diatas garis normal yang mengalami tegangan normal tekan dan tegangan geser. Retak membentuk sudut kurang dari 45° terhadap sumbu horizontal. Retak terjadi pada bidang yang tegak lurus terhadap bidang dimana tegangan tarik utama terjadi. Tegangan utama tekan terjadi sepanjang retakan diagonal.

2.7 Hasil Penelitian Sebelumnya

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

1. Jurnal berjudul "*Use of waste marble aggregate in concrete*" yang ditulis oleh *H. Hebhou, 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 kuat tekan maksimum pada kadar 25% yaitu sebesar 22,2 MPa.

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

Tabel 2.4

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.

3. 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.
4. 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.

5. Dhita Rizki Rahmawati (2016). Meneliti tentang “Pengaruh Penggunaan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton” menyatakan perbandingan kuat tekan tidak terlalu jauh antara beton dengan limbah batu *onyx* dan beton normal. Dengan selisih persentase terendah pada FAS 0,4 sebesar 12,431% dan tertinggi sebesar 21,344%. Pada FAS 0,5 selisih persentase terendah sebesar 3,364% dan tertinggi sebesar 13,614%. Sedangkan pada FAS 0,6 selisih persentase terendah sebesar 2,362% dan tertinggi sebesar 20,906%.
6. Abdullah Ghiyats D.U. (2016) dalam penelitian berjudul “Pengaruh Penggunaan Limbah Batu *Onyx* Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Campuran Beton Terhadap Modulus Elastisitas Beton” didapatkan hasil yaitu peningkatan modulus elastisitas pada beton *onyx*. Pada FAS 0,4 terjadi peningkatan nilai modulus elastisitas sebesar 38,59%. Pada FAS 0,5 terjadi peningkatan nilai modulus elastisitas sebesar 30,65%. Pada FAS 0,6 terjadi peningkatan nilai modulus elastisitas sebesar 22,80%.
7. Carlo Pellegrino and Flora Faleschini (2013), “*Experimental Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Slag as Recycled Aggregate*” menyatakan perilaku eksperimental balok RC yang dibuat dengan *slag* EAF sebagai agregat, menunjukkan bahwa balok ini memiliki kapasitas lentur dan geser tertinggi yang lebih tinggi daripada balok biasa, selain momen yang lebih tinggi dimana retak pertama terjadi. Umumnya, lebar retak berkurang dan pola retak serupa.
8. Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin, dan Snežana Marinković (2010) “*Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production*” Berdasarkan hasil uji beban pada balok beton bertulang, disimpulkan bahwa penggunaan tipe agregat kasar dan kuantitas tidak berpengaruh signifikan terhadap pola dan lebar retakan. Pertama, celah muncul di tengah bentang pada tingkat beban sama dengan sekitar sepertiga dari beban utama terlepas dari jenis betonnya. Lebar retak yang terukur kira-kira sama untuk ketiga balok yang diuji.
9. Valentino Leonard Yudika Putra dalam penelitian berjudul “Analisis Regangan Dan Pola Retak Yang Diakibatkan Beban Geser Pada Beton Ringan Beragregat Kasar Batu Apung Yang Diberi Lapisan Cat Keramik” disimpulkan Keseluruhan benda uji mengalami pola retak yang serupa yaitu retak geser. Retak geser adalah retak yang diakibatkan oleh beban geser. Benda uji beton yang menggunakan campuran batu apung yang dicat mengalami lebih banyak retakan dibandingkan dengan benda uji beton normal. Hal ini dikarenakan mutu beton yang diberi campuran batu apung yang

dilapisi cat lebih rendah dibandingkan dengan benda uji beton normal, sehingga terjadi lebih banyak retakan yang dapat menyebabkan keruntuhan pada benda uji.

10. Eiki Yamaguchi¹ and Wai-Fah Chen,² Member, ASCE (2015) “*Cracking Model For Finite Element Analysis Of Concrete Materials*” mengatakan bahwa pentingnya pendekatan mekanika fraktur nonlinier dikenali dengan jelas karena mekanika fraktur linier elastis memprediksi perilaku yang salah dari balok beton berlekuk. Hasil numerik dari masalah ini juga menunjukkan bahwa pola pembukaan retak dominan dalam perambatan retak akibat tekanan, dan tegangan lateral sangat berpengaruh terhadap retak.

2.8 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan tinjauan yang terdapat dalam penelitian sebelumnya maka penulis dapat mengambil hipotesis penelitian yaitu

1. Nilai kuat tekan beton dengan agregat normal akan lebih besar dibandingkan dengan beton dengan agregat limbah batu *onyx*.
2. Pola retak balok bertulang dengan agregat *onyx* akan berbeda dengan pola retak balok bertulang agregat normal.
3. Retak pada balok bertulang agregat limbah *onyx* lebih banyak daripada balok bertulang agregat normal.