

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Beton

Secara umum beton adalah bahan bangunan yang terbuat dari air, semen portland, agregat halus, dan agregat kasar, yang bersifat keras seperti batuan (Tjokrodikuljo,2012). Beberapa sifat beton yang sering dipakai antara lain :

1. Kekuatan

Beton bersifat getas, sehingga mempunyai kuat tekan tinggi namun kuat tariknya rendah. Kuat tekan beton biasanya berhubungan dengan sifat-sifat lain, maksudnya bila kuat tekannya tinggi, umumnya sifat-sifat yang lain juga baik. Berdasarkan kuat tekan beton dapat dibagi menjadi beberapa jenis yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa jenis beton menurut kuat tekannya

Jenis beton	Kuat tekan
Beton sederhana	sampai 10 MPa
Beton normal	15 - 30 MPa
Beton pra tegang	30 - 40 MPa
Beton kuat tekan tinggi	40 - 80 MPa
Beton kuat tekan sangat tinggi	> 80 MPa

Sumber : Tjokrodikuljo,2012

Beton sederhana dipakai untuk pembuatan bagian-bagian non-struktur, misalnya perkerasan lantai, dinding bukan penahan beban, dan sebagainya.

Beton jenis ini kuat tekannya dibawah 10 MPa.

Beton normal dipakai untuk struktur beton bertulang, bagian-bagian struktur penahan beban, misalnya kolom, balok, dinding yang menahan beban, dan sebagainya. Kuat tekan beton normal berkisar antara 15 MPa - 30 MPa. Khusus untuk struktur beton yang berada di daerah gempa, kuat tekannya minimum 20 MPa.

Beton prategang untuk balok prategang, yaitu balok dengan baja tulangan yang ditarik (ditegangkan) dulu sebelum diberi beban. Kuat tekan beton ini berkisar antara 30 MPa - 40 MPa. Biasanya digunakan untuk balok jembatan dan balok gedung dengan bentang agak panjang (sekitar 35 meter), tiang pancang, dan sebagainya.

Beton kuat tekan tinggi dan sangat tinggi dipakai pada struktur khusus, misalnya bantalan rel kereta api, tiang pancang, balok, dan kolom pada gedung bertingkat sangat banyak.

2. Berat jenis

Beton normal yang dibuat dengan agregat normal (pasir dan kerikil normal berat jenisnya antara 2,5 - 2,7) mempunyai berat jenis sekitar 2,3 - 2,4. Apabila dibuat dengan pasir atau kerikil yang ringan atau diberikan rongga udara maka berat jenis beton dapat berkurang dari 2,0. Jenis-jenis beton menurut berat jenisnya dan macam-macam pemakaiannya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Berat jenis beton menurut jenisnya

Jenis beton	Berat jenis	Pemakaian
Beton sangat ringan	< 1,00	non struktur
Beton ringan	1,00 - 2,00	struktur ringan
Beton normal	2,30 - 2,40	struktur
Beton berat	> 3,00	perisai sinar X

Sumber : Tjokrodinuljo, 2012

3. Modulus elastis

Modulus elastisitas beton tergantung pada modulus elastisitas agregat dan pastinya. Dalam perhitungan struktur boleh diambil modulus beton sebagai berikut :

$$E_c = (W_c)^{1,5} \cdot 0,043 \sqrt{f'_c} ; \text{ untuk } W_c = 1,5 - 2,5$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} ; \text{ untuk beton normal}$$

Dengan :

E_c = Modulus elastisitas beton, MPa

W_c = Berat jenis beton

f'_c = kuat tekan beton, MPa

4. Kerapatan air

Pada bangunan tertentu beton diharapkan dapat rapat air (kedap air) agar tidak bocor, misalnya plat atap, dinding *basement* dan sebagainya. Selain itu juga untuk mencegah terjadinya karat pada baja tulangan, diperlukan beton yang rapat air.

Beton rapat air (kedap air) ialah beton yang sangat padat sehingga air tidak dapat meresap ke dalamnya atau rembes melalui pori-pori dalam beton.

Pembuatan beton kedap air (Spesifikasi Beton Bertulang Kedap Air, SNI-03-2941-1992) dapat diusahakan dengan cara :

- a. Menambah butiran pasir halus (yaitu semen dan pasir yang lebih kecil dari 0,30 mm) sampai sekitar 400 - 520 kg per meter kubik beton.
- b. Menambah jumlah semen sampai sekitar 280 - 380 kg per meter kubik beton.
- c. Faktor air semen maksimum 0,45-0,50 (tergantung kedap air tawar, atau kedap air payau / air laut)
- d. Memakai jenis semen portland tertentu (tergantung kedap air tawar, atau kedap air payau / air laut)

5. Susutan pengerasan

Volume beton setelah keras sedikit lebih kecil daripada volume beton sewaktu masih lunak (beton segar), karena pada waktu mengeras mengalami sedikit susut karena peristiwa penguapan air. Bagian yang susut adalah pastinya, karena agregat tidak berubah volume. Oleh karena itu, semakin banyak pastinya semakin besar susutan betonnya. Sedangkan pasta itu sendiri, semakin besar faktor air-semen semakin besar susutannya. Susutan beton sekitar $2 \cdot 10^{-3}$ dan pastinya sekitar $6 \cdot 10^{-3}$.

6. Ketahanan terhadap ausan, cuaca, zat kimia

Pada bangunan tertentu beton khusus diharapkan dapat tahan terhadap ausan, abrasi, atau erosi, misalnya pada lapisan perkerasan jalan raya,

landasan pesawat udara, permukaan bendung, dinding dan dasar saluran air, dasar terjunan air, dan sebagainya.

B. Semen Portland

Semen adalah bahan yang mempunyai sifat adhesif maupun kohesif, yaitu bahan pengikat. Definisi semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silika-silika kalsium yang bersifat hidraulis bersama bahan-bahan yang biasa digunakan yaitu gypsum (SII 0013-1981). Ada dua macam semen, yaitu semen hidraulis dan semen non-hidraulis. Semen non-hidraulis adalah semen (perekat) yang dapat mengeras tetapi tidak stabil dalam air. Semen hidraulis adalah semen yang akan mengeras bila bereaksi dengan air, tahan terhadap air (*water resistance*) dan stabil di dalam air setelah mengeras. Empat senyawa kimia yang utama dari semen portland antara lain Trikalsium Silikat (C_3S), Dikalsium Silikat (C_2S), Trikalsium Aluminat (C_3A), Tetrakalsium Aluminoferrit (C_4AF).

Tabel 3. Empat senyawa utama dari semen portland

Nama oksida utama	Rumus empiris	Rumus oksida	Notasi pendek	Kadar rata-rata (%)
Trikalsium Silikat	Ca_3SiO_5	$3CaO.SiO_2$	C_3S	50
Dikalsium Silikat	Ca_2SiO_4	$2CaO.SiO_2$	C_2S	25
Trikalsium Aluminat	$Ca_3Al_2O_6$	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	12
Tetrakalsium Aluminoferrit	$2CaAlFeO_5$	$4CaO.Al_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF	8
Kalsium Sulfat Dihidrat (Gypsum)		$CaSO_4.2H_2O$	CSH_2	3,5

Sumber : Nugraha, P dan Antoni, 2007

Tabel 4. Sifat masing-masing komposisi utama semen

Bahan	Kecepatan hidrasi	Panas hidrasi (Joule/gram)	Andil terhadap kekuatan	Susut
C ₃ S	cepat	503 - tinggi	>> dalam 28 hari	sedang
C ₂ S	lambat	260 - rendah	> setelah 28 hari	sedang
C ₃ A	sangat cepat	867 - sangat tinggi	> dalam 1 hari	besar
C ₄ AF	cepat	419 - sedang	sedikit	kecil

Sumber : Nugraha, P dan Antoni, 2007

Melihat sifat yang berbeda dari masing-masing komponen ini kita dapat membuat bermacam jenis semen hanya dengan mengubah kadar masing-masing komponennya. Misalnya kita ingin mendapatkan semen yang mempunyai kekuatan awal yang tinggi maka kita perlu menambah kadar C₃S. ASTM (*American Standard for Testing Material*) menentukan komposisi semen berbagai tipe pada Tabel 5.

1. Tipe I adalah semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus seperti pada tipe lain.
2. Tipe II adalah semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang. Untuk mencegah serangan sulfat maka pada semen tipe ini, senyawa C₃A harus dikurangi. Semen tipe ini biasa digunakan pada bangunan seperti pelabuhan, pondasi, bangunan-bangunan yang berhubungan dengan rawa, dan saluran-saluran air buangan.
3. Tipe III adalah semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi. Pada semen tipe ini kuat tekan pada umur 3 hari mendekati dengan umur 7 hari pada semen tipe I. Untuk mempercepat proses hidrasi maka semen tipe ini dibuat lebih halus dengan

specific surface tidak kurang dari 2800 cm²/gr. Proporsi senyawa C₃S dibuat lebih besar dan proporsi senyawa C₂S lebih kecil. Semen tipe ini biasa digunakan pada bangunan-bangunan seperti pembuatan beton pracetak, perbaikan *pavment*, dan pembetonan di daerah cuaca dingin.

4. Tipe IV adalah semen portland yang dalam penggunaannya menurut persyaratan panas hidrasi yang rendah. Untuk mengurangi panas hidrasi yang terjadi, maka semen tipe ini senyawa C₃S dan C₃A dikurangi. Semen tipe ini memiliki kuat tekan yang lebih rendah dari semen tipe I. Semen tipe ini biasanya digunakan pada bangunan-bangunan seperti konstruksi DAM, *basement*, dan pembetonan pada daerah bercuaca panas.
5. Tipe V adalah semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan yang sangat tahan terhadap sulfat. Penggunaan semen tipe ini sama dengan pada semen tipe II dengan kontaminasi sulfat yang lebih pekat.

Tabel 5. Jenis-jenis semen portland dengan sifat-sifatnya

Tipe semen	Sifat pemakaian	Kadar senyawa (%)				Kehalusan blaine (m ² /kg)	Kuat 1 hari (kg/cm ²)	Panas hidrasi (J/g)
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
I	Umum	50	24	11	8	350	1000	330
II	Modifikasi	42	33	5	13	350	900	250
III	Kekuatan awal tinggi	60	13	9	8	450	2000	500
IV	Panas hidrasi rendah	25	50	5	12	300	450	210
V	Tahan sulfat	40	40	9	9	350	900	250

Sumber : Nugraha, P dan Antoni, 2007

Kuat tekan minimum semen tipe I sampai tipe V dengan umur rencana 1,3,7 dan 28 hari terdapat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kuat tekan minimum semen portland

Umur	Kuat tekan minimum (kg/cm ²)				
	Tipe I	Tipe II	Tipe III	Tipe IV	Tipe V
1 hari	-	-	125	-	-
3 hari	125	100	250	-	85
7 hari	200	175	-	70	150
28 hari	-	-	-	175	210

Sumber : Standar Industri Indonesia, (SII-0013-81) yang mengadopsi ASTM C-150-80

Pengikatan (*set*) adalah perubahan bentuk dari bentuk cair menjadi bentuk padat, tetapi masih belum mempunyai kekuatan. Pengikatan ini terjadi akibat reaksi hidrasi yang terjadi pada permukaan butir semen, terutama butir trikalsium aluminat. Dengan penambahan gypsum, waktu pengikatan dapat diatur karena gypsum memodifikasi hidrasi awal. Pengerasan (*hardening*) adalah pertumbuhan kekuatan dari beton atau mortar setelah bentuknya menjadi padat.

Semen bila dicampur dengan air akan menghasilkan pasta yang plastis dan lecah (*workable*). Namun setelah selang beberapa waktu, pasta akan mulai menjadi kaku dan sukar dikerjakan. Inilah yang disebut pengikatan awal (*initial set*). Selanjutnya pasta akan meningkat kekakuannya sehingga didapatkan padatan yang utuh. Ini disebut pengikatan akhir (*final set*). Proses berlanjut hingga pasta mempunyai kekuatan, disebut pengerasan (*hardening*). Pada umumnya waktu pengikatan awal minimum adalah 45 menit, sedangkan waktu pengikatan akhir adalah 6 - 10 jam.

Persentase semen portland pada komposisi pembuatan beton sebesar 10%. Tetapi hal tersebut sangat penting karena fungsi semen sebagai pengikat agregat sangat mempengaruhi kualitas beton. Bahan dasar semen pada umumnya ada 3 macam yaitu klinker atau terak (70%-95% merupakan hasil olahan pembakaran batu kapur, batu silika, pasir besi dan lempung), gypsum (sekitar 5%, sebagai zat pelambat pengerasan) dan material ketiga seperti batu kapur, pozzolan, abu terbang, dan lain-lain. Jika unsur ketiga tersebut tidak lebih dari 3% umumnya masih memenuhi kualitas OPC (*Ordinary Portland Cement*) tipe I. Namun bila kandungan material ketiga 6%-35%, maka semen tersebut akan berganti menjadi PCC (*Portland Composite Cement*). Jenis semen portland yang digunakan pada penelitian ini adalah semen portland tipe I OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan PCC (*Portland Composite Cement*).

1. OPC (*Ordinary Portland Cement*)

Semen tipe I OPC (*Ordinary Portland Cement*) didefinisikan sebagai semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain (SNI 15-2049-2004). Semen portland tipe I OPC merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak/klinker semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silika yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan gypsum dan bahan tambahan anorganik lain dengan kadar berbeda yang terdapat pada semen jenis PCC. Semen jenis OPC memiliki panas hidrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan semen jenis PCC. Pada semen jenis OPC memiliki syarat fisik dan syarat kimia yang harus dipenuhi.

Untuk syarat fisik semen jenis OPC dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Syarat fisik *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan *Portland Composite Cement* (PCC)

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1.	Kehalusan dengan alat blaine	m ² /kg	min. 280
2.	Kekekalan bentuk dengan autoclave: • pemuaian • penyusutan	% %	maks. 0,80 maks. 0,20
3.	Waktu pengikatan dengan alat vicat: • pengikatan awal • pengikatan akhir	menit menit	min. 45 maks. 375
4.	Kuat tekan : • umur 3 hari • umur 7 hari • umur 28 hari	kg/cm ² kg/cm ² kg/cm ²	min. 125 min. 200 min. 250
5.	Pengikatan semu: • penetrasi akhir	%	min. 50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

Sumber : SNI 15-2049-2004 dan SNI 15-7064-2004

Semen jenis OPC memiliki persyaratan kimia yaitu mengandung C₃A maksimum 8%, maka SO₃ maksimum 3% dari komposisi total semen yang terkandung dalam beton. Bahan penyusun OPC (*Ordinary Portland Cement*) yaitu 96% klinker/terak dan 4% gypsum.

2. PCC (*Portland Composite Cement*)

PCC (*Portland Composite Cement*) adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak/klinker semen portland dan gypsum dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silika, *limestone*, abu terbang dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari masa

semen portland. Semen jenis PCC dapat digunakan pada konstruksi umum seperti pekerjaan beton, pasangan bata, selokan, jalan, pagar dinding dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, bata beton (*paving block*) dan sebagainya (SNI 15-7064-2004).

Pada semen jenis PCC mempunyai panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan, sehingga pengerjaannya akan lebih mudah dan menghasilkan permukaan beton/plester yang lebih rapat dan lebih halus. Semen jenis PCC memiliki syarat fisik dan syarat kimia yang terpenuhi. Untuk syarat fisik semen jenis PCC dapat dilihat pada Tabel 7. Pada semen jenis PCC memiliki syarat kimia yaitu mengandung SO_3 lebih dari 4% dari komposisi total semen yang terkandung dalam beton. Bahan penyusun semen PCC (*Portland Composite Cement*) yaitu 80% klinker/terak, 10% pozzolan (trass), 6% *limestone*, dan 4% gypsum.

C. Agregat

Agregat adalah material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi, yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu semen hidraulik atau adukan. Agregat diperoleh dari sumber daya alam yang telah mengalami pengecilan ukuran secara alamiah melalui proses pelapukan dan aberasi yang berlangsung lama. Atau agregat dapat juga diperoleh dengan memecah batuan induk yang lebih besar.

Mengingat bahwa agregat menempati 70-75% dari total volume beton maka kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton. Dengan agregat yang baik, beton dapat dikerjakan (*workable*), kuat, tahan lama (*durable*) dan ekonomis. Pengaruhnya bisa dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Pengaruh sifat agregat pada sifat beton

Sifat agregat	Pengaruh pada	Sifat beton
Bentuk, tekstur, dan gradasi	Beton cair	Kelecekan, pengikatan, dan pengerasan
Sifat fisik, sifat kimia, dan mineral	Beton keras	Kekuatan, kekerasan, ketahanan (<i>durability</i>)

Sumber : Nugraha, P dan Antoni, 2007

1. Sifat-sifat mekanik agregat

a. Daya Lekat (*Bond*)

Bentuk butir dan tekstur permukaan agregat akan mempengaruhi kekuatan beton terutama beton mutu tinggi. Tekstur lebih kasar akan menyebabkan daya lekat yang lebih besar antara partikel dengan pasta.

b. Kekuatan

Kekuatan yang dibutuhkan pada agregat lebih tinggi dari pada kekuatan beton karena tegangan sebenarnya yang terjadi pada masing-masing partikel lebih tinggi dari pada tegangan nominal yang diberikan.

c. Kekerasan

Kekerasan agregat sangat diperlukan khususnya pada beton untuk sktruktur jalan atau pada lantai beton yang memikul beban lalu lintas yang berat.

Kekerasan agregat dapat diukur dengan *Los Angeles Test*.

d. *Toughness* (Keuletan)

Keuletan adalah daya tahan agregat terhadap pecah akibat tumbukan, pengukuran keuletan biasanya dilakukan dengan uji kejut.

2. Sifat-sifat fisik agregat

a. *Specific Gravity* (Berat Jenis)

Berat jenis agregat adalah perbandingan berat di udara dari suatu unit volume terhadap berat air dengan volume yang sama. Pengukuran berat jenis dapat dilakukan pada 3 kondisi yaitu

- 1) *Apparent Specific Gravity* (Berat Jenis Absolut) yaitu perbandingan berat agregat tanpa pori di udara dengan volumenya.
- 2) *Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry)* yaitu perbandingan berat agregat, termasuk berat air dalam pori dengan volumenya.
- 3) *Bulk Specific Gravity (Dry)* yaitu perbandingan berat agregat, termasuk pori di udara dengan volumenya.

b. *Bulk Density* (Berat Volume)

Berat volume adalah berat aktual yang akan mengisi suatu penampung/wadah dengan volume satuan. Berat volume diukur dalam kondisi padat dan gembur.

c. Porositas dan Absorpsi

Porositas dan absorpsi mempengaruhi daya lekat antara agregat dengan pasta, daya tahan terhadap abrasi, dan mempengaruhi nilai *specific gravity*.

Absorpsi agregat ditentukan dengan pengurangan berat dari kondisi SSD ke kondisi oven.

d. Kadar air

Nilai kadar air berubah ubah sesuai dengan kondisi cuaca. Kadar air adalah perbandingan antara pengurangan berat tersebut terhadap berat kering dalam persen.

Pengukuran kadar air sangat diperlukan pada pelaksanaan pencampuran beton sehingga kelecakan dan faktor air semen adukan beton tetap.

Sifat fisik dan mekanik mempengaruhi kekuatan, kekerasan, dan ketahanan dari beton, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian yang penting dalam pembuatan mortar atau beton. Secara umum, agregat penyusun beton dapat dibedakan menjadi agregat kasar dan agregat halus.

1. Agregat Kasar

Agregat kasar untuk beton adalah agregat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu, dan mempunyai ukuran antara 5-40 mm.

Tabel 9. Gradasi standar agregat kasar

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos		
	37,5 - 4,75	19,0- 4,75	12,5 - 4,75
50	100	-	-
38,1	95 - 100	-	-
25	-	100	-
19	35 - 70	90 - 100	100
12,5	-	-	90 - 100
9,5	10 - 30	20 - 55	40 - 70
4,75	0 - 5	0 - 10	0 - 15
2,36	-	0 - 5	0 - 5
pan			

Sumber : ASTM-C33

Besar butir maksimum yang diizinkan tergantung pada maksud pemakaian.

Ukuran agregat sangat mempengaruhi kekuatan tekan beton. Semakin besar agregat maksimum yang digunakan, semakin berkurang kekuatan beton yang dihasilkan.

Hal ini dikarenakan semakin besar agregat kasar, ruang antar agregat yang dihasilkan semakin besar sehingga potensi terjadinya rongga udara akan semakin tinggi dan dapat menyebabkan semakin kecilnya kekuatan tekan yang dihasilkan.

2. Agregat Halus

Agregat halus untuk beton adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu dan mempunyai ukuran butir lebih kecil dari 5 mm.

Tabel 10. Gradasi standar agregat halus

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos
9,5	100
4,75	95 - 100
2,36 (No.8)	80 - 100
1,18 (No.16)	50 - 85
0,6 (No.30)	25 - 60
0,3 (No.50)	10 - 30
0,15 (No.100)	2 - 10
Pan	

Sumber : ASTM-C33

Agregat halus berfungsi mengisi pori-pori yang ada di antara agregat kasar, sehingga diharapkan dapat meminimalkan kandungan udara dalam beton yang dapat mengurangi kekuatan beton. Gradasi dan keseragaman agregat halus lebih menentukan kelecakan (*workability*) dari pada gradasi dari keseragaman agregat kasar karena mortar berfungsi sebagai pelumas sedangkan agregat kasar hanya mengisi ruang saja pada beton. Beton mutu tinggi saat ini dikembangkan menggunakan agregat halus yaitu pasir ukuran 0,125-0,5 mm (DIN 4226-1). Pada beton mutu tinggi harus memiliki susunan

gradasi ukuran butiran yang dapat mengisi ruang kosong pada semen. Dengan pemilihan gradasi yang tepat akan diperoleh kepadatan per satuan volume.

D. Air

Air merupakan bahan yang penting pada beton yang menyebabkan terjadinya reaksi kimia dengan semen. Semen tidak bisa menjadi pasta tanpa air. Air harus selalu ada di dalam beton cair, tidak saja untuk hidrasi semen, tetapi juga untuk mengubahnya menjadi suatu pasta sehingga beton lecah (*workable*). Air akan digunakan sebagai campuran beton harus memenuhi syarat sebagai berikut :

Tabel 11. Batas toleransi zat kimia pada air

Kotoran	Kotoran maks (ppm)	Keterangan
Suspensi	2.000	Silt, tanah liat, bahan organik
Ganggang	500 - 1.000	Air entrain
Karbonat	1.000	Mengurangi <i>setting time</i>
Bikarbonat	400 - 1.000	400 ppm untuk Ca, Mg
Sodium sulfat	10.000	Kekuatan dapat meningkat, tapi kekuatan akhir menurun
Magnesium sulfat	40.000	
Sodiu klorida	20.000	Mengurangi <i>setting time</i> , kekuatan dini meningkat tapi kekuatan akhir menurun
Kalsium klorida	50.000	
Magnesium klorida	40.000	
Garam besi	40.000	
Phosphat, arsenat, borat	500	Memperlambat <i>setting time</i>
Garam Zn,Cu, Mn, Sn	500	
Asam inorganis	10.000	pH tidak kurang dari 3,0
Sodium hidroksida	500	
Sodium sulfida	100	Beton harus diuji
Gula	500	Mempengaruhi <i>setting time</i>

Sumber : Nugraha, P dan Antoni, 2007

Pengaruh kotoran pada campuran beton secara umum bisa menyebabkan :

1. Gangguan pada hidrasi dan pengikatan.
2. Gangguan pada kekuatan dan ketahanan.
3. Perubahan volume yang dapat menyebabkan keretakan.
4. Korosi pada tulangan baja maupun kehancuran beton.
5. Bercak-bercak pada permukaan beton.

1. Faktor Air Semen

Faktor air semen (fas) adalah berbanding jumlah penggunaan air dengan jumlah penggunaan semen (w/c) dalam suatu campuran mortar atau beton. Perbandingan yang dipakai dalam hal ini adalah perbandingan berat. Semakin tinggi nilai fas maka semakin rendah mutu beton yang dihasilkan, akan tetapi nilai fas yang semakin rendah tidak selalu berarti bahwa kekuatan beton semakin tinggi. Nilai fas yang sangat rendah akan menyebabkan kesulitan dalam pengerjaan, yaitu kesulitan dalam pelaksanaan pemadatan yang pada akhirnya akan menyebabkan mutu beton menurun. Umumnya nilai fas minimum yang diberikan sekitar 0,4 dan maksimum 0,65.

D.A. Abrams pada tahun 1918 menyatakan bahwa “untuk material yang diberikan, kekuatan beton hanya tergantung pada satu faktor saja, yaitu faktor air semen dari pasta”.

E. Bahan Tambahan

Bahan tambahan ialah suatu bahan berupa bubuk atau cairan, yang ditambahkan ke dalam campuran adukan beton selama pengadukan, dengan tujuan untuk

mengubah sifat adukan atau beton (Spesifikasi Bahan Tambahan untuk Beton, Standar, SK SNI S-18-1990-03). Pemberian bahan tambahan pada adukan beton dengan maksud untuk memperlambat waktu pengikatan, mempercepat pengerasan, menambah encer adukan, menambah daktilitas, mengurangi retak-retak pengerasan, mengurangi panas hidrasi, menambah kekedapan, menambah keawetan, dan sebagainya. Bahan kimia tambahan (*chemical admixture*) untuk beton ialah bahan tambahan yang dicampur pada adukan beton, untuk memperoleh sifat-sifat khusus dalam pengerjaan adukan, waktu pengikatan, waktu pengerasan, dan maksud-maksud lainnya (SK SNI S-04-1989-F).

1. *Superplasticizer*

Superplasticizer adalah bahan tambahan kimia (*chemical admixture*) yang melarutkan gumpalan-gumpalan dengan cara melapisi pasta semen, sehingga semen dapat tersebar dengan merata pada adukan beton dan mempunyai pengaruh dalam meningkatkan *workability* beton sampai pada tingkat yang cukup besar. Bahan ini digunakan dalam jumlah yang relatif sedikit karena sangat mudah mengakibatkan terjadinya *bleeding*. *Superplasticizer* dapat mereduksi air sampai 40 % dari campuran awal.

Beton berkekuatan tinggi dapat dihasilkan dengan pengurangan kadar air, akibat pengurangan kadar air akan membuat campuran lebih padat sehingga pemakaian *superplasticizer* sangat diperlukan untuk mempertahankan nilai *slump* yang tinggi. Keistimewaan penggunaan *superplasticizer* dalam campuran pasta semen maupun campuran beton antara lain :

- a) Menjaga kandungan air dan semen tetap konstan sehingga didapat campuran dengan *workability* tinggi.
- b) Mengurangi jumlah air dan menjaga kandungan semen dengan kemampuan kerjanya tetap sama serta menghasilkan faktor air semen yang lebih rendah dengan kekuatan yang lebih besar.
- c) Mengurangi kandungan air dan semen dengan faktor air semen yang konstan tetapi meningkatkan kemampuan kerjanya sehingga menghasilkan beton dengan kekuatan yang sama tetapi menggunakan semen lebih sedikit.
- d) Tidak ada udara yang masuk. Penambahan 1% udara kedalam beton dapat menyebabkan pengurangan kekuatan rata-rata 6%. Untuk memperoleh kekuatan yang tinggi, diharapkan dapat menjaga udara didalam beton serendah mungkin. Penggunaan *superplasticizer* menyebabkan sedikit bahkan tidak ada udara masuk kedalam beton.

Secara umum, partikel semen dan air cenderung untuk berkoheisi satu sama lainnya dan partikel semen akan menggumpal. Penambahan *superplasticizer*, partikel semen ini akan saling melepaskan diri dan terdispersi. Dengan kata lain *superplasticizer* mempunyai dua fungsi yaitu, mendispersikan partikel semen dari gumpalan partiel dan mencegah kohesi antar semen. Fenomena dispersi partikel semen dengan penambahan *superplasticizer* dapat menurunkan viskositas pasta semen, sehingga pasta semen lebih fluida/alir. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan air dapat diturunkan dengan penambahan *superplasticizer*.

2. *Silica Fume*

Silica fume adalah material yang terdiri dari partikel halus dengan diameter 0,1-1,0 mikrometer. Berfungsi sebagai pengganti sebagian dari semen atau bahan tambahan pada saat sifat-sifat khusus beton dibutuhkan, seperti penempatan mudah, kekuatan tinggi, permeabilitas rendah, durabilitas tinggi, dan lain sebagainya. Menurut standar "Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar" (ASTM.C.1240,1995), *silica fume* adalah material pozzolan yang halus, dimana komposisi silika lebih banyak dihasilkan dari tanur tinggi atau sisa produksi silikon atau *alloy* besi silikon. Kandungan *silica fume* yaitu >85% SiO₂, Cl 0,09-0,2%, dan alkalis 0,5-1,5%. Berat jenis relatif *silica fume* umumnya berkisar antara 2,2-2,5.

Kegunaan *silica fume* secara geometrikan adalah kemampuannya mengisi rongga-rongga diantara bahan pasta dan mengakibatkan membaiknya distribusi ukuran pori dan berkurangnya total volume pori. Namun kenyataan di lapangan, ternyata penggunaan *silica fume* memiliki kekurangan. Beton yang mengandung *silica fume* mempunyai kecenderungan yang meningkat bahwa beton tersebut akan mengalami retak susut.

Untuk itu kita bisa gunakan beberapa cara, yakni salah satunya adalah beton *silica fume* yang masih segar harus secepatnya diberi perlindungan agar penguapan air yang cepat dapat dicegah. Penggunaan *silica fume* dapat menghasilkan beton yang kedap, awet dan berkekuatan tinggi.

F. Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi adalah beton yang mempunyai sifat khusus yang berbeda dengan beton biasa, seperti tingkat susut (*shrinkage*) rendah, permeabilitas rendah, modulus elastisitas tinggi dan kuat tekan tinggi. Beton mutu tinggi memiliki kuat tekan 50-80 MPa.

Beton mutu tinggi umumnya memiliki faktor air semen yang rendah (*fas*) dengan rentang 0,2-0,35. Semakin rendah *fas* maka porositas beton juga cenderung semakin rendah. Pada pencampuran, beton mutu tinggi ditambahkan *admixture* seperti *superplasticizer* dengan dosis dan jumlah yang tepat, agar *workabilitas* beton tetap tinggi. Selain itu penambahan material berukuran lebih kecil dari semen, seperti *silica fume* berfungsi mengurangi rongga di dalam beton sehingga beton menjadi lebih padat. Jika terjadi peningkatan kepadatan, porositas dalam beton berkurang dan menyebabkan beton lebih kedap terhadap air dan material perusak lainnya sehingga beton menjadi lebih tahan lama. Menurut *American Concrete Institute (ACI) Committee*, beton mutu tinggi adalah beton yang memenuhi kombinasi kerja khusus sesuai dengan yang diinginkan dan tidak ditemui secara rutin pada beton konvensional, diantaranya :

1. Mudah pengerjaannya.
2. Berkekuatan tinggi di usia dini.
3. Kedap dan padat.
4. *Durable* terhadap lingkungan, kekerasan yang memadai.
5. Umur layan lebih lama (sekitar 75 tahun atau lebih).
6. Panas hidrasi yang rendah.

7. Stabilitas volume yang memadai (minimum *shrinkage* atau ekspansi termal).
8. Kemampuan mengalir (*flowability*) dan *pumpability* yang memadai.

G. Kuat Tekan

Kuat tekan adalah besarnya beban per satuan luas, yang dapat ditahan sampai dengan menyebabkan benda uji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin uji. Kuat tekan beton ditentukan oleh proporsi bahan yaitu semen, agregat halus, agregat kasar, dan air sebagai komponen pembentuk beton. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama dalam penentuan kuat tekan beton.

Sifat yang paling penting dari beton adalah kuat tekan beton. Kuat tekan beton biasanya berhubungan dengan sifat-sifat lain, maksudnya apabila kuat tekan beton tinggi, sifat-sifat yang lain juga baik.

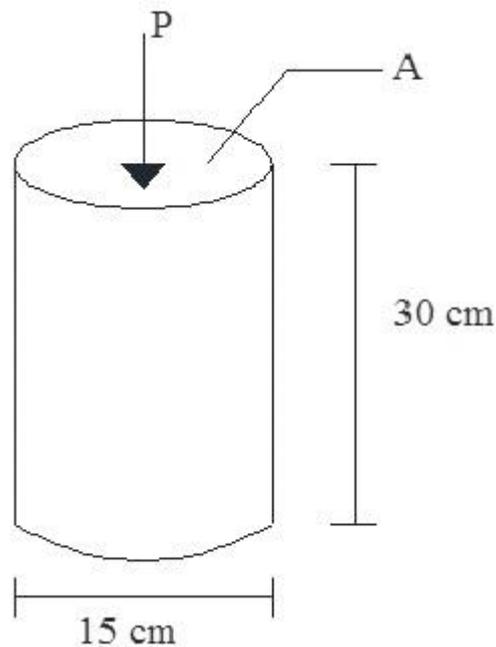
Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan benda uji adalah

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan : P = Kuat tekan beton yang didapat dari benda uji (MPa)

F = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)



Gambar 1. Uji kuat tekan beton

Beban tekan maksimum pada saat benda uji pecah dibagi luas penampang benda uji merupakan nilai kuat tekan beton yang dinyatakan dalam MPa atau kg/cm^2 .

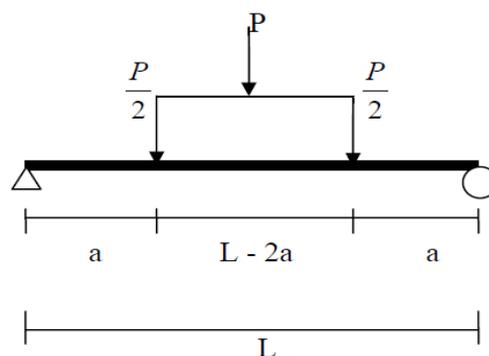
Beton relatif kuat menahan tekan. Besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh sejumlah faktor diantaranya

1. Faktor air semen. Hubungan faktor air semen dan kuat tekan beton secara umum adalah bahwa semakin rendah nilai faktor air semen, semakin tinggi kuat tekan betonnya. Namun kenyataannya pada suatu nilai faktor air semen semakin rendah, maka beton semakin sulit dipadatkan. Dengan demikian, ada suatu nilai faktor air semen yang optimal dan menghasilkan kuat tekan yang maksimal.
2. Jenis semen dan kualitasnya mempengaruhi kekuatan rata-rata beton.

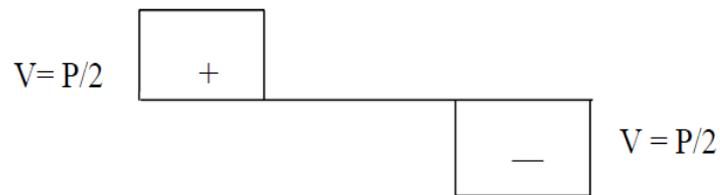
3. Jenis dan bidang permukaan agregat. Kenyataan menunjukkan bahwa penggunaan agregat batu pecah akan menghasilkan beton yang kuat tekan yang lebih besar daripada kerikil.
4. Efisiensi dari perawatan (*curing*). Perawatan adalah hal yang sangat penting pada pekerjaan di lapangan dan pada pembuatan benda uji.
5. Suhu. Pada umumnya kecepatan pengerasan beton bertambah dengan bertambahnya suhu. Pada titik beku kuat tekan akan tetap rendah untuk waktu yang lama.
6. Umur pada keadaan yang normal. Kekuatan beton bertambah dengan bertambahnya umur, tergantung pada jenis semen.

H. Kuat Lentur

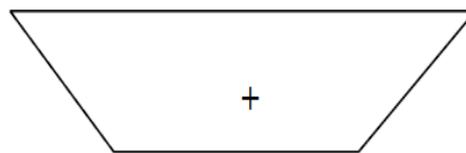
Lentur murni adalah suatu lentur yang berhubungan dengan lendutan sebuah balok di bawah suatu momen lentur (*bending moment*) konstan yang berarti bahwa gaya lintangnya sama dengan nol. Sebaliknya lentur tidak merata berhubungan dengan lentur dalam kehadiran gaya-gaya lintang, yang berarti bahwa momen lenturnya akan bergerak sepanjang balok. (Timoshenko dan Gere, 1996).



Gambar 2. Balok sederhana yang dibebani 2 buah gaya $P/2$



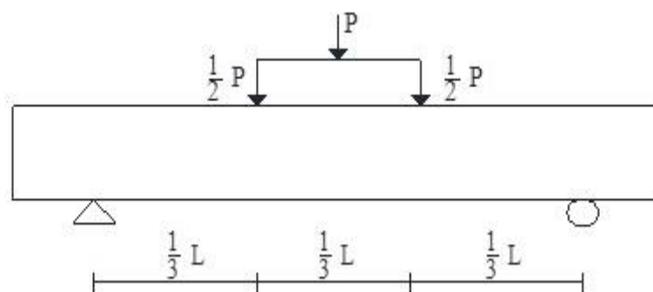
Gambar 3. Diagram gaya lintang



Gambar 4. Diagram momen lentur

Daerah di antara beban $P/2$ tidak memiliki gaya lintang dan hanya dikenakan suatu momen lentur yang besarnya $M = \frac{P}{2} \times a$, karena itu daerah pusat dari balok ini berada dalam keadaan lentur murni (Timoshenko dan Gere, 1996). Daerah-daerah yang memiliki panjang a di dekat ujung-ujung balok berada dalam keadaan lentur tak merata karena momen M tidaklah konstan dan terdapat gaya-gaya lintang.

Menurut ASTM C78-94 rumus kuat lentur beton dinyatakan dalam modulus Rupture (R). Rumus kuat lentur beton $\frac{1}{3}$ bentang ($\frac{1}{3} L$) yaitu :



Gambar 5. Pembebanan sepertiga bentang

$$R = \frac{P.L}{b.d^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

- Keterangan :
- R = Kuat lentur beton (MPa)
 - P = Maksimum beban yang diterima (N)
 - L = Panjang bentang (mm)
 - d = tinggi balok (mm)
 - b = lebar balok (mm)

Apabila suatu gelagar balok bentang sederhana menahan beban yang mengakibatkan timbulnya momen lentur, akan terjadi deformasi lentur di dalam balok tersebut. Pada kejadian momen lentur positif, tegangan tekan akan terjadi di bagian atas dan tegangan tarik akan terjadi di bagian bawah dari penampang. Tegangan-tegangan tersebut harus ditahan oleh balok. Jika beban bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan tegangan tambahan yang mengakibatkan bertambahnya retak lentur pada balok.

Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya akan terjadi keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen.

Pada saat beton struktur bekerja menahan beban-beban yang dipikulnya, balok beton akan mengalami tegangan-tegangan pada badannya. Salah satu tegangan yang terjadi adalah tegangan tarik akibat lenturan tepi bawah pada balok dengan tumpuan sederhana.

Kekuatan lentur merupakan kekuatan beton dalam menahan lentur yang umumnya terjadi pada balok struktur. Kuat lentur dapat diteliti dengan membebani balok pada tengah-tengah bentang atau pada setiap sepertiga bentang dengan beban titik P. Beban ditingkatkan sampai kondisi balok mengalami

keruntuhan lentur, dimana retak utama yang terjadi terletak pada sekitar tengah-tengah bentang. Besarnya momen akibat gaya pada saat runtuh ini merupakan kekuatan maksimal balok beton dalam menahan lentur.

Pada beton normal, jika dihubungkan dengan kuat tekannya nilai kuat lentur beton dapat dihitung berdasarkan SNI-03-2847-2002 dengan menggunakan rumus :

$$f_r = 0,7 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan : f_r = Kuat lentur teori (MPa)

f'_c = Kuat tekan rata-rata (MPa)

I. Penelitian Terdahulu

Afif, M (2008), telah melakukan pengujian pada kuat tekan beton dengan pemakaian semen yang berbeda menggunakan metode eksperimental laboratorium yaitu dengan menambahkan *superplasticizer* dan *silica fume*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil kuat tekan dan prosentase peningkatan kuat tekan beton dengan umur beton. Hasil penelitian beton dengan bahan tambahan *superplasticizer* dan *silica fume* ditinjau pada umur 14, 28, 45, dan 56 hari. Sampel PPC SP 2% SF 0% menunjukkan prosentase kuat tekan sebesar 81,61%, 100%, 106,28%, dan 113,90%. Sampel PPC SP 2% SF 5% menunjukkan prosentase kuat tekan beton terhadap umur sebesar 86,44%, 100%, 116,95% dan 120,34%. Sampel PCC SP 2% SF 0% menunjukkan prosentase kuat tekan sebesar 91,84%, 100%, 103,01%, dan 105,15%. Begitu juga pada sampel PCC SP 2% SF 5% menunjukkan prosentase kuat tekan beton terhadap umur sebesar 91,91%, 100%, 101,47% dan 103,31% kuat tekan tinggi

dihasilkan oleh sampel PPC SP 2% SF 5% umur 56 hari dengan kuat tekan optimum sebesar 54,16 MPa. Dengan perbedaan dua jenis semen dapat diketahui prosentase kuat tekan tinggi dicapai pada umur 56 hari terjadi pada sampel PPC SP 2% SF 5%.

Satyarno, Imam (2007), telah melakukan pengujian beton mutu tinggi (kuat tekan sekitar 80 MPa). Penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik agregat pembuat beton mutu tinggi, proporsi campuran dan untuk mengetahui karakteristik beton yang meliputi berat jenis, kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas. Agregat yang digunakan adalah agregat halus dari sungai Krasak, Kabupaten Sleman dan agregat kasar menggunakan ukuran maksimum 10 mm dari desa Watugajah, Gedangsari, Kabupaten Gunung Kidul, yang keduanya merupakan agregat lokal Yogyakarta. Semen menggunakan semen *portland* tipe I dan bahan *admixture* dari produk Sika yaitu *Silica Fume*, *viscocrete-10* dan *plastiment-VZ*. Variasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini adalah faktor air semen 0,22: 0,24: 0,26 dan kadar *silica fume* 0%, 5%, dan 10%. Faktor air semen 0,22 dan kadar *silica fume* 10% menghasilkan kuat tekan (umur 28 hari) mencapai 92,41 MPa.

Tasykurun, Hanif (2012), telah melakukan pengujian beton dengan tujuan penelitian adalah untuk mengetahui sejauh mana pengaruh penggantian semen dengan *fly ash* (abu terbang) terhadap mutu kuat tekan beton dan untuk mengetahui sejauh mana kuat tekan beton terhadap serangan sulfat. Komposisi penggantian semen dengan *fly ash* sebanyak 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Larutan sulfat yang digunakan adalah asam sulfat dengan kadar 5%.

Sampel yang digunakan adalah kubus (15cm x 15cm x 15cm) mutu beton yang direncanakan adalah K300. Sampel diuji pada umur 7 hari, 28 hari, dan 56 hari. Dari hasil penelitian menggunakan semen OPC merk Baturaja didapat kadar *fly ash* optimum berada pada campuran 10% dengan kuat tekan pada umur pemeliharaan 56 hari sebesar 462,22 kg/cm² dan apabila dibandingkan dengan kuat tekan beton yang menggunakan semen PCC merk Baturaja, beton dari semen OPC lebih kuat. Sedangkan untuk beton *fly ash* yang direndam dengan sulfat 5% selama 56 hari didapat kuat tekan maksimum beton OPC + *fly ash* sebesar 277,04 kg/cm² dan kuat tekan beton PCC merk Baturaja sebesar 227,41 kg/cm². Dapat disimpulkan bahwa *fly ash* asal Tarahan Lampung sangat baik digunakan sebagai bahan pengganti pada semen OPC.

Rasyid, Abdurakhman (2011), pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penggunaan semen PCC dan semen jenis OPC dengan beberapa pelakuan perawatan pada terapan beton. Pengujian kuat tekan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pada perawatan *steam* dilakukan juga uji kuat tekan pada umur 4 jam. Mutu beton yang direncanakan adalah K225 dan K350 dengan menggunakan semen jenis PCC (Baturaja, Tiga Roda dan Padang) dengan semen jenis OPC (Baturaja). Jenis perawatan beton yang dilakukan berupa *non curing*, *moist curing*, dan *steam curing*. Berdasarkan hasil pengujian, kuat tekan beton mutu K225 dan mutu K350 dengan perawatan perendaman umur 28 hari, semen jenis OPC merk Baturaja lebih tinggi dari pada semen PCC merk Baturaja tetapi memiliki kuat tekan yang lebih rendah dari PCC Tiga Roda dan PCC Padang. Jenis perawatan beton dengan cara perendaman merupakan cara yang paling baik dibandingkan dengan perawatan uap dan tanpa perawatan.