

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Uraian Umum

Mulai tahap perencanaan, penelitian hingga tahap analisa, penelitian dilaksanakan berdasarkan sumber-sumber yang berkaitan dengan topik yang dipilih, yaitu penelitian tentang *bottom ash* yang difungsikan menjadi pengganti pasir dalam beton. Sumber-sumber yang digunakan berupa peraturan-peraturan, referensi-referensi dan juga penelitian-penelitian sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya.

Pada bab ini dibahas mengenai teori-teori yang mendasari penelitian yang dilaksanakan. Materi-materi yang dibahas berdasarkan referensi-referensi maupun peraturan-peraturan mengenai teknologi beton, antara lain :

- Teori tentang beton
- *Bottom ash* sebagai bahan pengganti agregat
- Material pada beton
- Perencanaan pencampuran beton (*mix design*)

2.2. Teori Tentang Beton

Beton didefinisikan sebagai bahan yang diperoleh dengan mencampurkan agregat halus, agregat kasar, semen portland dan air tanpa tambahan zat aditif (PBI, 1971). Tetapi belakangan ini definisi dari beton sudah semakin luas, yaitu beton adalah bahan yang terbuat dari berbagai macam tipe semen, agregat dan juga bahan pozzolan, abu terbang, terak dapur tinggi, sulfur, serat dan lain-lain (Neville dan Brooks, 1987).

Dalam perencanaan beton sering dikenal istilah beton konvensional, yaitu beton dengan penggunaan material, teknologi dan peralatan yang masih sederhana. Nilai kuat tekan beton dapat diketahui dari hasil pengujian kuat tekan terhadap benda uji kubus (150 x 150 x 150 mm) yang dibebani dengan gaya tekan dengan kecepatan dan besar tertentu secara bertahap hingga benda uji tersebut hancur.

2.2.1. Kuat Tekan Beton

Sifat beton yang baik adalah jika beton tersebut memiliki kuat tekan tinggi (antara 20 – 50 Mpa, pada umur 28 hari). Dengan kata lain dapat diasumsikan bahwa mutu beton ditinjau hanya dari kuat tekannya saja (Tjokrodinuljo, 1996).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan beton, yaitu :

a. Faktor air semen (FAS) dan kepadatan

Didalam campuran beton air mempunyai dua buah fungsi, yang pertama untuk memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan dan yang kedua sebagai pelicin campuran kerikil, pasir dan semen agar lebih mudah dalam pencetakan beton.

Kekuatan beton tergantung pada perbandingan faktor air semennya, semakin rendah nilai faktor air semen maka semakin tinggi kuat tekan betonnya (Duff Abrams, 1919). Sehingga dapat disimpulkan bahwa hampir untuk semua tujuan, beton yang mempunyai faktor air semen minimal dan cukup untuk memberikan workabilitas tertentu yang dibutuhkan untuk pemadatan, merupakan beton yang terbaik. (L.J. Murdock and K.M. Brooks, 1979)

b. Umur beton

Kuat tekan beton akan bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton tersebut. Berikut ini adalah perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur sesuai dengan Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan kuat tekan beton pada berbagai umur

Umur (hari)	3	7	14	21	28	90	365
PC biasa	0.40	0.65	0.88	0.95	1.00	1.20	1.35
PC dengan kekuatan awal tinggi	0.55	0.75	0.90	0.95	1.00	1.15	1.20

(Sumber : PBI, 1971)

c. Jenis dan jumlah semen

Mengacu pada SK SNI S-04-1989-F semen portland dipisahkan menurut pemakaiannya menjadi 5 jenis :

- Jenis I : untuk kontruksi pada umumnya, yang biasa disebut sebagai semen portland jenis umum (*normal portland cement*).
- Jenis II : untuk kontruksi bangunan yang mempunyai konsentrasi sulfat tinggi, terutama sekali bila diisyaratkan agak tahan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang (*modified portland cement*).
- Jenis III : untuk kontruksi yang menuntut persyaratan kekuatan awal yang tinggi (*high early strengt portland cement*)
- Jenis IV : untuk kontruksi dengan persyaratan panas hidrasi rendah (*low heat portland cement*).
- Jenis V : untuk kontruksi yang menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat (*sulfate resisting portland cement*).

Untuk jumlah semen yang terlalu sedikit berarti jumlah air yang digunakan juga semakin sedikit sehingga menyebabkan adukan beton sulit untuk dipadatkan, dan berpengaruh pada kemudahan pengerjaannya.

d. Sifat agregat

Sifat yang paling penting dari suatu agregat (batu-batuan, kerikil, pasir dan lain-lain) adalah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan, yang dapat mempengaruhi ikatannya dengan pasta semen, porositas dan karakteristik penyerapan air yang mempengaruhi daya tahan terhadap proses pembekuan waktu musim dingin dan agresi kimia, serta ketahanan terhadap penyusutan. (L.J. Murdock dan K.M. Brook, 1979)

Menurut Tjokrodinuljo (1996), sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton adalah kekasaran permukaan dan ukuran maksimumnya. Pada agregat dengan permukaan kasar akan terjadi ikatan yang baik antara pasta semen dengan agregat tersebut. Pada agregat berukuran besar luas permukaannya menjadi lebih sempit sehingga lekatan dengan pasta semen menjadi berkurang.

2.3. Bottom Ash

Bottom ash adalah limbah dari sisa pembakaran batubara. Pada waktu pembakaran batubara pada suatu pembangkit tenaga batubara, akan menghasilkan sisa pembakaran yang terdiri dari 80 % berupa *fly ash* dan sisanya 20 % berupa *bottom ash*. *Bottom ash* mempunyai karakteristik fisik berwarna abu-abu gelap, berbentuk butiran, berporos, mempunyai ukuran butiran antara pasir hingga kerikil.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jesse J. Nowak, Alliant Energy, Coal Combustion Products Manager – Western Region (2004) bahwa limbah batu bara berupa *bottom ash* mengandung larutan kapur dan lumpur dengan jumlah terkecilnya Oksida yang mengandung aluminium (Al), besi (Fe), Magnesium (Mg), Sulfur (S) dan sisa-sisa material.

2.3.1. Kegunaan Bottom Ash

Salah satu cara pengolahan limbah batu bara yaitu dengan proses solidifikasi / stabilisasi (SS) dengan sementasi yang memanfaatkan limbah batubara (*bottom ash*) sebagai agregat atau bahan baku tambahan pembuatan bahan bangunan.

Berdasarkan komposisi yang terkandung dalam *bottom ash* maka ada beberapa kemungkinan manfaat atau kegunaan dari *bottom ash* antara lain :

- Sebagai *filler* atau pengisi pada campuran aspal dan beton
- Sebagai lapisan base dan sub base pada perkerasan jalan
- Sebagai bahan filtrasi
- Sebagai agregat dalam semen dan beton ringan

(Sumber : JesseNowak@alliantenergy.com, 2004)

2.3.2. Keuntungan Penggunaan Bottom Ash

Ada beberapa keuntungan yang dapat kita peroleh apabila kita menggunakan *bottom ash* antara lain:

- Bagi pembeli / pengguna : *bottom ash* lebih murah dan tidak beracun

- Bagi perusahaan / industri : penggunaan limbah batubara sebagai bahan yang bermanfaat akan mengurangi pencemaran lingkungan dan menekan biaya penggunaan lahan untuk menampung limbah tersebut.
- Bagi masyarakat : penggunaan limbah batubara merupakan solusi yang tepat untuk mengurangi permasalahan lingkungan akibat pencemaran limbah sehingga lingkungan menjadi lebih nyaman.

2.3.3. Karakteristik *Bottom Ash*

Karakteristik dari *bottom ash* ini telah diteliti oleh *American Coal Ash Association*, (2004).

a. Karakteristik Fisik

Bottom ash mempunyai butiran partikel sangat berpori pada permukaannya. Partikel *bottom ash* mempunyai batasan ukuran dari kerikil sampai pasir. *Bottom ash* merupakan material dengan gradasi yang baik, dengan variasi ukuran partikel yang berbeda-beda. Ukuran *bottom ash* lebih mendekati ukuran pasir, biasanya 50 % - 90 % lolos pada saringan 4.75 mm (No. 4), 10 % - 60 % lolos pada saringan 0.6 mm (No. 40), 0 % - 10 % lolos pada saringan 0.075 mm (No. 200), dan ukuran paling besar berkisar antara 19 mm (3/4 in) sampai 38.1 mm (1-1/2 in).

Tabel 2.2. Ukuran butiran dari partikel *bottom ash*
(persentase lolos saringan)

Ukuran Saringan	<i>Bottom Ash</i>		
	Glasgow	New Haven	Moundsville
38 mm (1-1/2 in)	100	99	100
19 mm (3/4 in)	100	95	100
9.5 mm (3/8 in)	100	87	73
4.75 mm (No. 4)	90	77	52
2.36 mm (No. 8)	80	57	32

1.18 mm (No. 16)	72	42	17
0.60 mm (No. 30)	65	29	10
0.30 mm (No. 50)	56	19	5
0.15 mm (No.100)	35	15	2
0.075 mm (No.200)	9	4	1

(Sumber : JesseNowak@alliantenergy.com, 2004)

b. Karakteristik Kimia

Komposisi kimia dari *bottom ash* yaitu silika, alumina dan besi dengan sedikit kalsium, magnesium, sulfat, dan komponen yang lain. Tabel 2.3 menyajikan analisis kimia dari contoh *bottom ash* dari tipe batubara yang berbeda dan dari kawasan yang berbeda pula.

Tabel 2.3. Komposisi kimia dari *Bottom Ash*

(prosentase berat).

Tipe Batubara	Tipe <i>Bottom Ash</i>				
	Bitumen		Sub-bitumen	Lignit	
Lokasi	West Virginia	Ohio	Texas		
SiO ₂	53.6	45.9	47.1	45.4	70.0
Al ₂ O ₃	28.3	25.1	28.3	19.3	15.9
Fe _s O ₃	5.8	14.3	10.7	9.7	2.0
CaO	0.4	1.4	0.4	15.3	6.0
MgO	4.2	5.2	5.2	3.1	1.9
Na ₂ O	1.0	0.7	0.8	1.0	0.6
K ₂ O	0.3	0.2	0.2	-	0.1

(Sumber : JesseNowak@alliantenergy.com, 2004)

Berdasarkan data hasil dan analisa contoh batubara dari PT. Primatexco yang diperoleh dari Sucofindo, 2005 mengenai karakteristik kimia dari *bottom ash* dan *fly ash*, sebagai berikut :

Tabel 2.4. Hasil analisa sampel batubara

Parameter	Satuan	Hasil		Metode
		<i>Bottom ash</i>	<i>Fly ash</i>	
Silicon dioxide (SiO ₂)	%	32.32	44.70	ASTM D – 3682
Alumunium trioxide (Al ₂ O ₃)	%	22.60	27.58	ASTM D – 3682
Iron trioxide (Fe ₂ O ₃)	%	9.22	8.05	ASTM D – 3682
Titanium dioxide(Ti O ₂)	%	3.37	2.68	ASTM D – 2795
Calcium oxide (CaO)	%	2.09	1.86	ASTM D – 3682
Magnesium oxide (MgO)	%	1.13	0.98	ASTM D – 3682
Pottasium Oxide (K ₂ O)	%	1.72	1.71	ASTM D – 3682
Sodium Oxide (Na ₂ O)	%	0.46	0.41	ASTM D – 3682
Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₃)	%	0.62	0.69	ASTM D – 2795
Sulfur Trioxide (SO ₃)	%	0.94	0.44	ASTM D – 3682
Manganese Trioxide (Mn ₃ O ₄)	%	0.03	0.02	ASTM D – 3682

(Sumber : PT. Sucifindo, 2005)

2.4. Material

Material penyusun pada beton dengan campuran *bottom ash* ini tidak berbeda dengan material penyusun beton pada umumnya, yaitu terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, air dan *bottom ash* sebagai tambahan. Semua bahan-bahan diatas mempunyai karakteristik yang berbeda bila digunakan sebagai bahan adukan dalam beton. Dengan alasan ini maka perlu diketahui sifat dan karakteristik masing-masing material penyusun beton agar dalam pelaksanaan nanti tidak terjadi kesalahan pemilihan dan penggunaan material, sehingga dapat menghasilkan beton dengan kekuatan karakteristik yang dikehendaki.

2.4.1 Semen Portland (PC)

Portland cement (PC) atau lebih dikenal dengan semen merupakan suatu bahan yang mempunyai sifat hidrolis, semen membantu pengikatan agregat halus dan agregat kasar apabila tercampur dengan air. Selain itu, semen juga mampu mengisi rongga-rongga antara agregat tersebut.

A. Sifat Kimia Semen

Sifat kimia dari semen portland sangat rumit, dan belum dimengerti sepenuhnya. Perkiraan terhadap komposisi semen portland diberikan pada tabel 2.3 hampir dua pertiga bagian semen terbentuk dari zat kapur yang proporsinya berperan penting terhadap sifat-sifat semen. Zat kapur yang berlebihan kurang baik untuk semen karena menyebabkan terjadinya *disintegrasi* (perpecahan) semen setelah timbul ikatan. Kadar kapur yang tinggi tetapi tidak berlebihan cenderung memperlambat pengikatan, tetapi menghasilkan kekuatan awal yang tinggi. Kekurangan zat kapur menghasilkan semen yang lemah. (L.J. Murdock dan K.M. Brook, 1979)

Tabel 2.5. Prosentase dari komposisi dan kadar senyawa kimia semen

Senyawa	Prosentase
Batu kapur (CaO)	60 % - 65 %
Pasir silikat (SiO ₂)	17 % - 25 %
Alumina (Al ₂ O ₃)	3 % - 8 %
Besi Oksida (Fe ₂ O ₃)	0.5 % - 6 %
Magnesia (MgO)	0.5 % - 4 %
Sulfur (SO ₃)	1 % - 2 %

(Sumber : Tjokrodimuljo, 1996)

Dalam semen pada dasarnya ada 4 senyawa penting, yaitu :

- Trikalsium silikat (C₃S)
- Dikalsium silikat (C₂S)
- Trikalsium aluminat (C₃A)
- Tetrakalsium aluminoforit (C₄AF)

Senyawa C_3S dan C_2S merupakan senyawa penyusun utama dari semen dengan prosentase sekitar 70 % - 80 % yang menyebabkan semen bersifat sebagai perekat, selain itu senyawa ini juga berpengaruh terhadap pengerasan semen. Kadar C_3S yang lebih besar dari C_2S , umumnya menyebabkan semen menjadi cepat mengeras. Semen portland yang cepat mengeras (*rapid hardening cement portland*) mengandung kadar C_3S yang cukup tinggi, yaitu sekitar 60 %.

Senyawa C_3A jika bercampur dengan air akan mengalami hidrasi sangat cepat disertai dengan pelepasan sejumlah panas dan kemudian hancur. Oleh karena itu senyawa ini tidak mempunyai sifat mengikat. Kandungan senyawa C_3A yang lebih besar dari 18 % mengakibatkan semen menjadi tidak kekal bentuk karena sifatnya yang hancur, sehingga menjadikan semen mengembang pada waktu pengerasan.

Senyawa yang keempat C_4AF , kurang berpengaruh pada semen portland. Senyawa ini hanya memperlambat pengerasan jika kadarnya tinggi.

B. Sifat Fisik Semen

Semen portland mempunyai beberapa sifat fisik, bisa dijelaskan sebagai berikut :

1. Kehalusan butir

Semakin halus semen, maka permukaan butirannya akan semakin luas, sehingga persenyawaannya dengan air akan semakin cepat dan membutuhkan air dalam jumlah yang besar pula. Kehalusan dari semen dapat ditentukan dengan berbagai cara, antara lain dengan analisa saringan. Semen pada umumnya mampu lolos saringan 44 mikron dalam jumlah 80 % beratnya.

2. Berat jenis dan berat isi

Berat jenis semen pada umumnya berkisar 3.15 kg/liter. Berat jenis ini penting untuk diketahui karena semen dengan berat jenis yang rendah dan dicampur dengan bubuk batuan lain, pada pembakarannya menjadi titik sempurna.

Berat isi semen bergantung pada cara pengisiannya ke dalam takaran. Cara pengisian gembur, berat isinya akan rendah sekitar 1.1 Kg/liter, sedangkan

cara pengisian padat akan menghasilkan berat isi yang relatif tinggi sekitar 1.5 Kg/liter.

3. Waktu pengerasan semen

Pada pengerasan semen dikenal dengan adanya waktu pengikatan awal (*initial setting*) dan waktu pengikatan akhir (*final setting*). Waktu pengikatan awal dihitung sejak semen tercampur dengan air hingga mengeras. Pengikatan awal untuk semua jenis semen harus diantara 60 – 120 menit. Pada percobaan untuk mengetahui pengikatan awal harus diperhatikan semen dan air yang digunakan, karena mempengaruhi pengerasan dari semen. Alat *vicat* dapat digunakan untuk mengetahui pengikatan awal.

4. Kekekalan bentuk

Bubur semen yang dibuat dalam bentuk tertentu dan bentuknya tidak berubah pada waktu mengeras, maka semen tersebut mempunyai sifat kekal bentuk. Demikian juga sebaliknya jika bubur semen tersebut mengeras dan menunjukkan adanya cacat (retak, melengkung, membesar dan menyusut), berarti semen tersebut tidak mempunyai sifat kekal bentuk.

Sifat kekal bentuk sangat dipengaruhi oleh kandungan senyawa C_3A , karena kandungan C_3A dalam jumlah tinggi menyebabkan bubur semen mengembang pada saat proses pengerasan karena dilepaskannya panas oleh senyawa tersebut.

5. Kekuatan semen

Pengukuran kekuatan semen biasanya dilakukan menggunakan nilai kuat tekan semen yang dicampur dengan pasir. Kekuatan semen sangat berpengaruh terhadap kualitas beton, karena semen sebagai bahan pengikat material beton.

6. Pengerasan awal palsu

Gips yang terurai lebih dulu dapat menimbulkan efek pengerasan palsu, seolah-olah semen terlihat mulai mengeras tetapi pengaruhnya terhadap sifat semen tidak berubah. Untuk mengatasinya, dengan mengaduk lagi adonan tersebut sehingga semen mengeras seperti biasa. Pengerasan palsu biasanya terjadi jika semen mengeras kurang dari 60 menit.

7. Pengaruh suhu

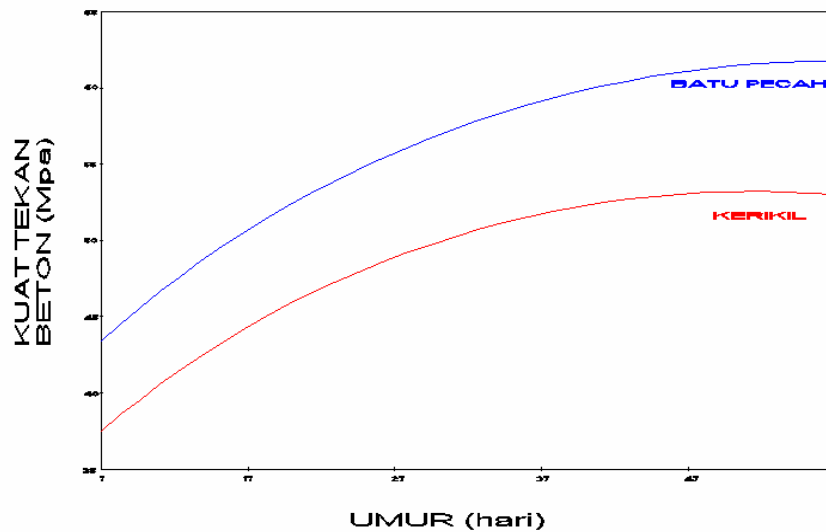
Pengikatan semen sangat tergantung oleh suhu di sekitarnya. Pengikatan semen berlangsung dengan baik pada suhu 35 °C dan berjalan dengan lambat pada suhu di bawah 15 °C.

2.4.2. Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Kira-kira 70 % volume mortar atau beton diisi oleh agregat. Agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar atau beton, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar atau beton (Tjokrodinuljo,1996).

Sedangkan menurut Neville dan Brooks (1987) agregat adalah bahan pengisi yang bersifat pasif, bahan murah yang dicampurkan ke dalam pasta semen sehingga menghasilkan beton dengan volume besar. Kenyataannya bahan pengisi tidak mutlak bersifat pasif karena sifat fisik, kimia dan termal dari bahan tersebut mempengaruhi sifat beton. Dari segi ekonomis lebih menguntungkan jika digunakan campuran beton dengan sebanyak mungkin bahan pengisi dan sedikit mungkin jumlah semen. Namun keuntungan dari segi ekonomis harus diseimbangkan dengan kinerja beton baik dalam keadaan segar maupun setelah mengeras.

Pengaruh kekuatan agregat terhadap beton begitu besar, karena umumnya kekuatan agregat lebih besar dari kekuatan pasta semennya. Namun kekasaran permukaan agregat berpengaruh terhadap kekuatan beton, seperti tampak pada grafik 2.1.



Gambar 2.1. Pengaruh jenis agregat terhadap kuat tekan beton
(Sumber : Tjokrodinuljo, 1996)

Agregat dapat dibedakan berdasarkan ukuran butiran. Agregat yang mempunyai ukuran butiran besar disebut agregat kasar, sedangkan agregat yang berbutir kecil disebut agregat halus. Dalam bidang teknologi beton nilai batas daerah agregat kasar dan agregat halus adalah 4,75 mm atau 4,80 mm. Agregat yang butirannya lebih kecil dari 4,8 mm disebut agregat halus. Secara umum agregat kasar sering disebut kerikil, kericak, batu pecah atau *split*. Adapun agregat halus disebut pasir, baik berupa pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai, tanah galian atau dari hasil pemecahan batu. Agregat yang butirannya lebih kecil dari 1,2 mm disebut pasir halus, sedangkan butiran yang lebih kecil dari 0,075 mm disebut lanau, dan yang lebih kecil dari 0,002 mm disebut lempung.

Agregat umumnya digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu:

- Batu, umumnya besar butiran lebih dari 40 mm
- Kerikil, untuk butiran antara 5 sampai 40 mm
- Pasir, untuk butiran antara 0,15 sampai 5 mm

Agregat harus mempunyai bentuk yang baik (bulat dan mendekati kubus), bersih, keras, kuat dan gradasinya baik. Agregat harus pula mempunyai kestabilan kimiawi dan dalam hal-hal tertentu harus tahan aus dan tahan cuaca.

2.4.2.1. Berat Jenis Agregat

Menurut berat jenisnya agregat dibagi menjadi 3 jenis yaitu:

a. Agregat Normal

Agregat normal memiliki berat jenis antara $2,5 \text{ kg/dm}^3$ dan $2,7 \text{ kg/dm}^3$. Agregat ini biasanya berasal dari batuan granit, basalt, kuarsa dan sebagainya. Beton yang dihasilkan memiliki berat jenis sekitar $2,3 \text{ kg/dm}^3$ dengan kuat tekan antara 15 Mpa sampai dengan 40 Mpa dan dinamakan beton normal.

b. Agregat Berat

Agregat berat memiliki berat jenis $2,8 \text{ kg/dm}^3$ ke atas, contohnya *magnetic* (Fe_3O_4), *barytes* (BaSO_4), atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan cocok untuk dinding pelindung radiasi sinar x.

c. Agregat Ringan

Agregat ringan memiliki berat jenis kurang $2,0 \text{ kg/dm}^3$. Agregat ringan misalnya *diatomite*, *pumice*, tanah bakar, abu terbang, busa terak tanur tinggi. Pada umumnya dibuat untuk beton non struktural, beton tahan api dan isolator panas.

2.4.2.2. Gradasi Agregat

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butiran agregat mempunyai ukuran yang sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butirannya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil dapat mengisi pori diantara butiran yang lebih besar sehingga pori-pori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampuan tinggi.

Agar diperoleh agregat dengan kemampuan tinggi, maka susunan gradasinya adalah sebagai berikut :

- Butir ukuran 20 mm – 40 mm = 29 %
- Butir ukuran 10 mm – 20 mm = 21 %
- Butir ukuran 5 mm – 10 mm = 15 %
- Butir ukuran < 5 mm = 35 %

Menurut peraturan *British Standard* yang dipakai di Indonesia (SK-SNI-T-15-1990-03) kekasaran pasir dapat dibagi menjadi 4 kelompok menurut gradasinya, yaitu pasir halus (daerah I), agak halus (daerah II), agak kasar (daerah III), dan kasar (daerah IV), seperti tampak pada tabel 2.6 dan grafik 2.2

Tabel 2.6. Gradasi pasir

Lubang Ayakan (mm)	Persen Berat Butir 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 : Tjokrodinuljo, 1996)

Adapun gradasi kerikil yang baik, sebaiknya masuk dalam batas-batas yang tercantum dalam tabel 2.7

Tabel 2.7. Gradasi kerikil

Lubang Ayakan (mm)	Persen Berat yang Lewat Ayakan	
	Besarnya Butir Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 - 100	100
20	30 - 70	95 - 100
10	10 - 35	25 - 55
4.8	0 - 5	0 - 10

(Sumber : Tjokrodinuljo, 1996)

2.4.2.3. Modulus Halus Butir

Modulus halus butir (*fineness modulus*) adalah suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan atau kekasaran butiran agregat. Modulus halus butir (FM) didefinisikan sebagai jumlah persen kumulatif dari butiran agregat yang tertinggal di atas ayakan. Selain itu FM (*fineness modulus*) juga dapat untuk mencari nilai perbandingan berat antara pasir dan kerikil, bila dibuat campuran beton. Modulus halus butir agregat dari campuran pasir dan kerikil untuk bahan pembuat beton berkisar antara 5,0 sampai 6,5.

$$FM = \frac{\text{jumlah \% butiran diatas ayakan 0.15}}{100}$$

2.4.2.4. Kadar Air Agregat

Kadar air pada suatu agregat (dilapangan) perlu diketahui untuk menghitung jumlah air yang diperlukan dalam campuran beton dan untuk mengetahui berat satuan agregat. Keadaan kandungan air di dalam agregat dibedakan menjadi beberapa tingkat, yaitu :

- a. Kering oven : benar-benar tidak berair, dan ini berarti dapat menyerap air secara penuh.
- b. Kering udara : butiran agregat kering permukaan, tetapi mengandung sedikit air di dalam pori. Oleh karena itu agregat dalam kondisi ini masih dapat menyerap air.
- c. Jenuh kering muka : pada kondisi ini tidak ada air di permukaan. Butiran agregat pada kondisi ini tidak menyerap dan juga tidak menambah jumlah air bila dipakai dalam campuran adukan beton.
- d. Basah : pada kondisi ini agregat mengandung banyak air, baik di permukaan maupun di dalam butiran, sehingga bila dipakai dalam campuran adukan beton akan menambah air.

Dari keempat keadaan di atas, hanya dua keadaan yang sering dipakai sebagai dasar hitungan, yaitu kering oven dan jenuh kering muka karena konstan untuk agregat tertentu.

Keadaan jenuh kering muka (*saturated surface dry, SSD*) lebih disukai sebagai standar, karena :

- a. Merupakan keadaan kebasahan agregat yang hampir sama dengan agregat dalam beton, sehingga agregat tidak menambah atau mengurangi air dari pasta.
- a. Kadar air di lapangan lebih banyak dalam keadaan SSD dibandingkan kering tungku.

Dalam hal ini hitungan kebutuhan air pada adukan beton, biasanya agregat dianggap dalam keadaan jenuh kering muka, sehingga jika keadaan di lapangan kering udara maka dalam adukan beton akan menyerap air, namun jika agregat dalam keadaan basah maka akan menambah air. Penyerapan penambahan air tersebut dapat dihitung dengan rumus :

$$\mathbf{A\ tamb} = \frac{K - K_{jkm}}{100} \times Wag$$

Keterangan :

A tamb : air tambahan dari agregat (liter)

K : kadar air di lapangan (%)

K_{jkm} : kadar air jenuh kering muka (%)

Wag : berat agregat (kg)

2.4.2.5. Persyaratan Agregat

Persyaratan agregat halus sebagai berikut:

1. Agregat halus harus terdiri dari butiran tajam dan keras. Butiran agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
2. Kandungan lumpur tidak boleh lebih dari 5 % berat (ditentukan terhadap berat kering). Lumpur adalah butiran yang dapat melalui ayakan 0,063 mm.
3. Tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak, yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Harder (dengan larutan NaOH). Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga

dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95 % dari kekuatan adukan agregat yang sama tetapi dicuci dalam larutan 3 % NaOH yang kemudian dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama.

4. Agregat halus harus terdiri dari butiran yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan berturut-turut 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm (PBI 1971), harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :
 - Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2 % berat
 - Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10 % berat
 - Sisa di atas ayakan 0,25 mm, harus berkisar 80 % - 95 % berat
 - Untuk pasir modulus halus butir antara 2,50 – 3,80
 - Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk-petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.

Persyaratan agregat kasar sebagai berikut:

1. Agregat kasar untuk beton dapat berupa kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu. Agregat kasar adalah agregat dengan besar butiran lebih dari 5 mm.
2. Agregat kasar harus terdiri dari batuan yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir hanya dapat dipakai apabila jumlah butiran pipih tersebut tidak melampaui 20 % dari berat agregat seluruhnya. Butiran agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
3. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 % berat (ditentukan terhadap berat kering). Apabila kadar lumpur melebihi 1 % berat maka agregat tersebut harus dicuci.
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat alkali yang reaktif.

5. Kekerasan dari butiran agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari *Rudelooff* dengan beban pengujian 20 ton, dan harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :
 - Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5 – 19 mm lebih dari 24 % berat
 - Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 19 – 30 mm lebih dari 22 % berat
6. Agregat kasar harus terdiri dari butiran yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan secara berurutan sebagai berikut : 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm (PBI 1971) harus memenuhi syarat-syarat :
 - Sisa di atas ayakan 31,5 mm, harus 0 % berat
 - Sisa di atas ayakan 4 mm, harus berkisar 90 % - 98 % berat
 - Selisih antara sisa-sisa kumulatif di atas ayakan yang berurutan maksimum 60 % dan minimum 10 % berat.

2.4.2.6. Pengujian Agregat

Pengujian agregat terdiri dari pemeriksaan kandungan lumpur dan kotoran organis yang terkandung dalam agregat, analisa saringan, analisa kadar air, berat jenis dan penyerapan air. Tujuan dari pemeriksaan kandungan lumpur dan kotoran organis pada agregat adalah untuk menentukan banyaknya kandungan butiran yang lebih kecil dari 50 mikron (lumpur) yang terdapat dalam agregat dan menentukan prosentase zat organis yang terkandung dalam agregat. Tujuan dari analisa saringan untuk menentukan modulus kehalusan pasir, yaitu harga yang menyatakan tingkat kehalusan agregat.

Pemeriksaan kadar air agregat bertujuan untuk menentukan prosentase air yang terkandung dalam agregat. Sedangkan tujuan dari pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat adalah untuk menentukan berat jenis dan prosentase berat air yang diserap agregat, dihitung terhadap berat kering. Pada pemeriksaan kadar air, berat isi dan berat jenis dilakukan dalam kondisi asli dan SSD. Kadar air asli adalah kandungan air pada agregat dalam keadaan normal. Sedangkan kadar air SSD adalah kandungan air pada kondisi agregat jenuh kering permukaan.

2.4.3. Air

Air merupakan salah satu bahan yang penting dalam pembuatan beton karena dapat menentukan mutu dalam campuran beton. Fungsi air pada campuran beton adalah untuk membantu reaksi kimia yang menyebabkan berlangsungnya proses pengikatan serta sebagai pelicin antara campuran agregat dan semen agar mudah dikerjakan.

Air diperlukan pada pembentukan semen yang berpengaruh terhadap sifat kemudahan pengerjaan adukan beton (*workability*), kekuatan, susut dan keawetan beton. Air yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen hanya sekitar 25 % dari berat semen saja, namun dalam kenyataannya nilai faktor air semen yang dipakai sulit jika kurang dari 0,35. Kelebihan air dari jumlah yang dibutuhkan dipakai sebagai pelumas, tambahan air ini tidak boleh terlalu banyak karena kekuatan beton menjadi rendah dan beton menjadi keropos. Kelebihan air ini dituang (*bleeding*) yang kemudian menjadi buih dan terbentuk suatu selaput tipis (*laitance*). Selaput tipis ini akan mengurangi lekatan antara lapis-lapis beton dan merupakan bidang sambung yang lemah (Tjokrodinuljo,1996).

Air yang memenuhi persyaratan sebagai air minum memenuhi syarat pula untuk bahan campuran beton (tetapi tidak berarti air untuk campuran beton harus memenuhi standar persyaratan air minum)

Air laut mengandung 3,5 % larutan garam, sekitar 78 % nya adalah sodium klorida dan 15 % nya adalah magnesium sulfat. Garam-garam dalam air laut ini dapat mengurangi kekuatan beton sampai 20 %. Air laut tidak boleh digunakan untuk campuran beton pada beton bertulang atau beton prategang, karena resiko terhadap korosi tulangan lebih besar.

Pemakaian air untuk beton sebaiknya memenuhi persyaratan (PBI 1971) :

1. Tidak mengandung Lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gr/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gr/liter
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gr/liter
4. Tidak mengandung senyawa-senyawa sulfat lebih dari 1 gr/liter.

2.5. Workabilitas

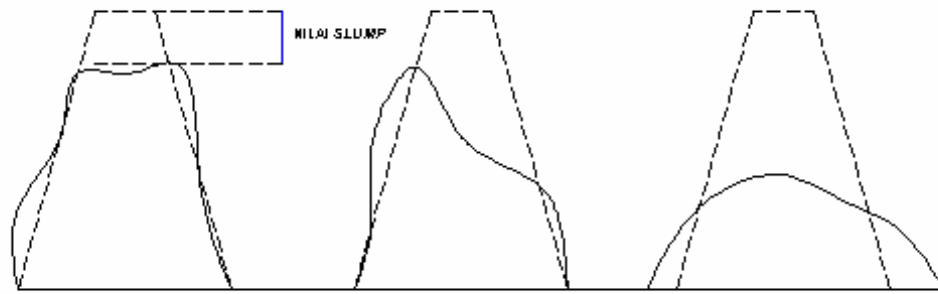
Workabilitas merupakan tingkat kemudahan pengerjaan beton dalam pencampuran, pengangkutan, penuangan, dan pematatannya. Suatu adukan dapat dikatakan cukup *workable* jika memenuhi kriteria sebagai berikut :

- a. *Plasticity*, artinya adukan beton harus cukup plastis (kondisi antara cair dan padat), sehingga dapat dikerjakan dengan mudah tanpa perlu usaha tambahan ataupun terjadi perubahan bentuk pada adukan.
- b. *Cohesiveness*, artinya adukan beton harus mempunyai gaya-gaya kohesi yang cukup sehingga adukan masih saling melekat selama proses pengerjaan beton.
- c. *Fluidity*, artinya adukan harus mempunyai kemampuan untuk mengalir selama proses penuangan.
- d. *Mobility*, artinya adukan harus mempunyai kemampuan untuk bergerak / berpindah tempat tanpa terjadi perubahan bentuk.

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecakan atau keenceran adukan beton. Makin cair adukan maka makin mudah cara pengerjaannya. Untuk mengetahui kelecakan suatu adukan beton biasanya dengan dilakukan pengujian *slump*. Semakin tinggi nilai *slump* berarti adukan beton makin mudah untuk dikerjakan. Nilai *slump* yang disyaratkan berkisar antara 5-12,5 cm (Tjokrodimuljo,1996)

Dalam praktek, ada tiga macam tipe *slump* yang terjadi yaitu

- a. *Slump* sebenarnya, terjadi apabila penurunannya seragam tanpa ada yang runtuh.
- b. *Slump* geser, terjadi bila separuh puncaknya bergeser dan tergelincir ke bawah pada bidang miring
- c. *Slump* runtuh, terjadi bila kerucut runtuh semuanya.



Gambar 2.2. Tipe-tipe keruntuhan *slump* (1) *slump* sebenarnya (2) *slump* geser (3) *slump* runtuh (Sumber : Neville dan Brooks, 1987)

2.6. Perencanaan Campuran Beton (*mix design*)

Perencanaan campuran beton (*concrete mix design*) dimaksudkan untuk mendapatkan beton dengan mutu sebaik-baiknya, antara lain:

- a. Kuat tekan yang tinggi
- b. Mudah dikerjakan
- c. Tahan lama
- d. Murah / ekonomis
- e. Tahan aus

Unsur-unsur pembentuk beton (semen, pasir, kerikil dan air) harus ditentukan secara proporsional, sehingga terpenuhi syarat-syarat:

1. Nilai kekenyalan atau kelecakan tertentu yang memudahkan adukan beton ditempatkan pada cetakan / bekisting (sifat kemudahan dalam mengerjakan) dan memberikan kehalusan permukaan beton segar.

Kekenyalan ditentukan dari :

- Volume pasta adukan
 - Keenceran pasta adukan
 - Perbandingan campuran agregat halus dan kasar
2. Kekuatan rencana dan ketahanan beton setelah mengeras.
 3. Ekonomis dan optimum dalam pemakaian semen.

Ada beberapa metode untuk merencanakan campuran beton, antara lain menurut SK SNI T-15-1990-03 dengan judul buku “*Tata cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*” adalah metode DOE (*Departement of Environment*) dari Inggris, metode JIS dari Jepang dan metode ACI (*American Concrete Institute*) dari Amerika. Adapun untuk perencanaan campuran beton pada penelitian ini digunakan cara DOE dari Inggris.

2.6.1. Perencanaan Campuran Beton (*mix design*) Berdasarkan DOE (*Departement of Environment*)

Perencanaan campuran beton dalam penelitian ini menggunakan campuran menurut cara Inggris (*British Standard*). Di Indonesia cara ini dikenal dengan metode DOE (*Departement of Environment*).

Langkah-langkah dalam perhitungan perencanaan beton dengan metode DOE adalah sebagai berikut :

1. Penentuan Kuat Tekan Beton

Penentuan kuat tekan beton berdasarkan kekuatan beton pada umur 28 hari. Pada penelitian ini direncanakan kuat tekan beton $K - 250$.

2. Penetapan Nilai Standar Deviasi (S)

Penentuan nilai standar deviasi berdasarkan 2 hal yaitu :

- Mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton.
Semakin kecil nilai standar deviasinya maka pengendalian pelaksanaan pencampuran beton semakin baik.
- Volume pekerjaan
Volume pekerjaan (m^3) semakin besar akan menghasilkan standar deviasi yang kecil.

Nilai standar deviasi pada penelitian ini yaitu $S = 46$ (volume beton kurang $1000 m^3$ dan mutu pengendalian pelaksanaan pencampuran beton baik sekali), penetapannya dengan melihat tabel 2.8.

Tabel 2.8. Mutu pelaksanaan pekerjaan diukur dengan deviasi standar (kg/cm²)

Volume Pekerjaan		Mutu Pelaksanaan		
Ukuran	Satuan (M ³)	Baik Sekali	Baik	Dapat Diterima
Kecil	< 1000	45 < S ≤ 55	55 < S ≤ 65	65 < S ≤ 85
Sedang	1000 – 3000	35 < S ≤ 45	45 < S ≤ 55	55 < S ≤ 75
Besar	> 3000	25 < S ≤ 35	35 < S ≤ 45	45 < S ≤ 65

(Sumber : PBI,1971)

3. Penetapan Kuat Tekan Rata-Rata yang Direncanakan

Dengan menganggap nilai dari hasil pemeriksaan benda uji menyebar normal (mengikuti lengkung dari Gauss), maka kekuatan tekan beton karakteristik adalah :

$$\sigma_{bk} = \sigma_{bm} - 1.645 * S.$$

Kuat tekan beton rata-rata dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma_{bm} = \sigma_{bk} + 1.645 * S ,$$

Keterangan

σ_{bm} = kuat tekan beton rata-rata (kg/cm²)

σ_{bk} = kuat tekan beton yang direncanakan (kg/cm²)

M = 1.645*S = nilai tambah margin (kg/cm²)

S = standar deviasi (kg/cm²)

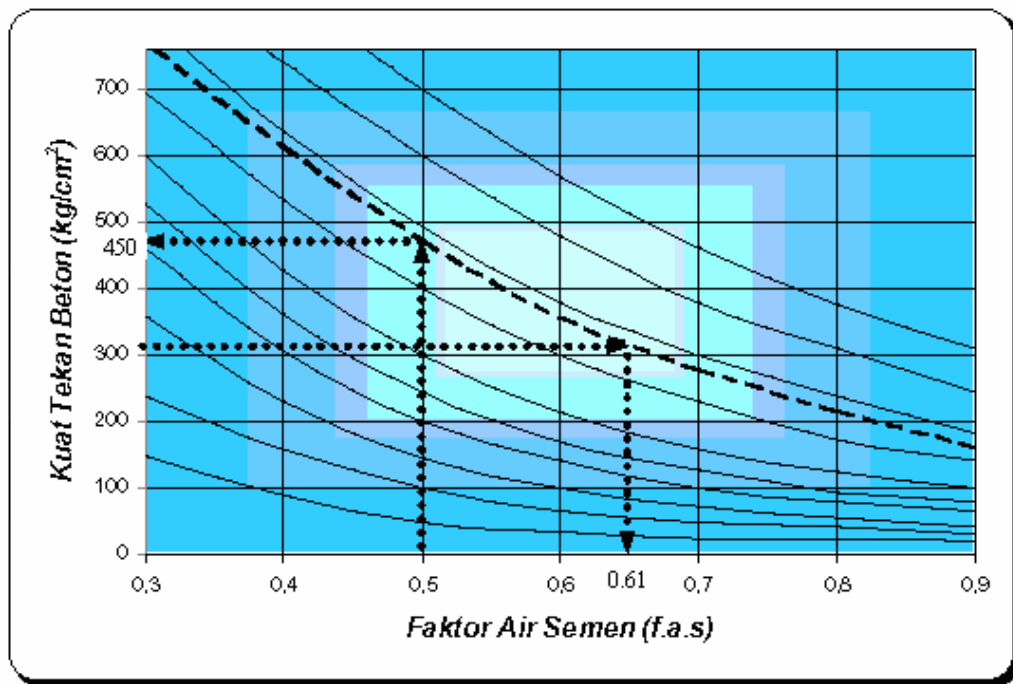
4. Mencari Faktor Air Semen (FAS)

Faktor air semen ditentukan oleh Tabel 2.9. Perkiraan pencapaian kekuatan tekan beton dengan faktor air semen 0.5 dan grafik 2.1, yaitu grafik hubungan antara kuat tekan beton dengan faktor air semen (f.a.s.).

Tabel 2.9. Perkiraan pencapaian kekuatan tekan beton dengan faktor air semen 0.5

Jenis Semen	Jenis Agregat Kasar	Kuat tekan (kg/cm ²)			
		3	7	28	91
Semen Portland biasa (PPC)	Batu alami	180	270	400	480
semen Portland tahan sulfat (SRPC)	Batu pecah	230	330	470	550
Semen Portland cepat mengeras (RHPC)	Batu alam	250	340	460	530
	Batu pecah	300	400	530	600

(Sumber : PBI,1971)



Grafik 2.1. Hubungan kuat tekan beton dengan faktor air semen (FAS)

Tabel 2.10. Jumlah semen minimum dan nilai faktor air semen maksimum

URAIAN	Jumlah Semen Minimum/m ³ beton (kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton didalam ruang bangunan :		
a. Keadaan keliling non korosif	275	0.6
b. Keadaan keliling korosif	325	0.52
Beton diluar ruang bangunan :		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari	325	0.6
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari	275	0.6
Beton yang masuk kedalam tanah :		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0.55
b. Mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah	375	0.52
Beton yang berhibungan dengan air :		
a. Air tawar	275	0.27
b. Air laut	375	0.52

(Sumber : PBI,1971)

Cara penentuan faktor air semen maksimum dan minimum yaitu:

1. Dengan menggunakan Tabel 2.9. untuk menentukan kekuatan beton pada umur tertentu. Pada penelitian ini, direncanakan umur beton 28 hari dengan perkiraan kuat tekan beton $\sigma_{bk} = 450 \text{ kg/cm}^2$, dan kuat tekan rata-rata $\sigma_{bm} = 325.67 \text{ kg/cm}^2$.
2. Dengan menggunakan Grafik 2.1, lukiskan kurva melalui titik nilai kekuatan tersebut paralel dengan kurva referensi.
3. Tarik garis mendatar dari perpotongan dengan nilai kekuatan tekan rata-rata, sehingga menemukan FAS pada garis absis. Dari grafik didapat FAS = 0.61. Sedangkan nilai FAS yang didapat dari persyaratan khusus (Tabel 2.10) yaitu FAS maksimum = 0.6, sehingga digunakan nilai FAS terendah yaitu 0.6 (didapat dari persyaratan khusus).

5. Penentuan Nilai *Slump*

Penentuan nilai slump berdasarkan pemakaian beton untuk jenis konstruksi tertentu (tabel 2.11)

Tabel 2.11. Penetapan nilai *slump*

Pemakaian Beton	Nilai Slump (cm)	
	maksimum	minimum
a. Dinding, pelat pondasi, dan telapak bertulang	12.5	5
b. Struktur dibawah tanah	9.0	2.5
c. Pelat, kolom, balok dan dinding	15.0	7.5
d. Pengerasan jalan	7.5	5
e. Pembetonan masal	7.5	2.5

(Sumber : PBI,1971)

6. Penentuan Nilai Kadar Air Bebas

Kadar air bebas ditentukan oleh tabel 2.12.

Tabel 2.12. Perkiraan kebutuhan air per meter kubik beton

Besar Ukuran Kerikil Maks. (mm)	Jenis Batuan	Slump (cm)			
		0-10	10-30	30-60	60-180
10	Alami	50	180	205	225
	Batu Pecah	180	205	230	250
20	Alami	35	160	180	195
	Batu Pecah	170	190	210	225
40	Alami	15	140	160	175
	Batu Pecah	155	175	190	205

(Sumber : PBI,1971)

7. Perhitungan Jumlah Semen yang Dibutuhkan

Kadar atau jumlah semen dapat dihitung dengan rumus :

$$\text{Kadar semen} = \frac{\text{kadarairbebas}}{fas}$$

Hasil yang didapat dari rumus tersebut dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari tabel 2.10 kemudian diambil nilai yang tertinggi.

8. Penentuan Prosentase Jumlah Agregat Halus dan kasar

Proporsi agregat halus halus ditentukan dengan metode penggabungan agregat dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Y = \frac{xa}{100} * ya + \left[\frac{100 - xa}{1000} \right] * yb$$

Keterangan :

Y = perkiraan prosentase kumulatif lolos # 9.6 dan # 0.6

menurut BS (*British standard*) – 882, prosentase kumulatif lolos # 9.6 dan # 0.6 bisa menggunakan Spec – Ideal 135 – 882, dimana :

perkiraan prosentase lolos ayakan # 9.6 = 50 %

perkiraan prosentase lolos ayakan # 0.6 = 18.5 %

Yb = prosentase kumulatif pasir lolos ayakan # 9.6 dan # 0.6

Ya = prosentase kumulatif split lolos ayakan # 9.6 dan # 0.6

xa = konstanta yang dicari baik dari agregat halus

$$X \text{ rata-rata} = \frac{x1 + x2}{2} \rightarrow \text{prosentase dari agregat halus}$$

Prosentase dari agregat kasar (Xb) = 100 % - Xa

9. Penentuan Berat Jenis Gabungan

Berat jenis gabungan adalah gabungan dari berat jenis agregat halus dan agregat kasar dengan prosentase dari campuran agregat tersebut. Berat jenis gabungan dapat dihitung dengan rumus :

$$BJgab = \frac{xa}{100} * Bjxa + \frac{xb}{100} * Bjxb$$

10. Penentuan Berat Beton Segar

Berat beton segar dapat ditentukan dengan menggunakan grafik 2.2. berdasarkan data berat jenis gabungan dan kebutuhan air pengaduk untuk setiap meter kubik.

Cara pembuatan grafik 2.2. dapat diterangkan sebagai berikut :

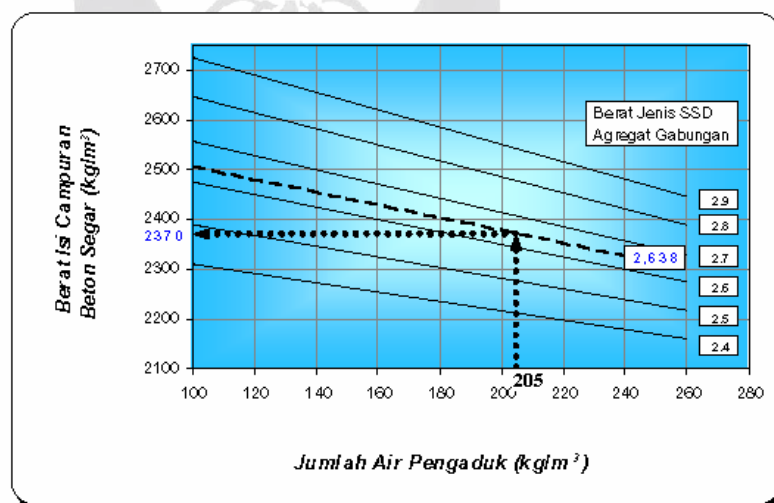
1. Buat garis vertikal melalui titik harga kadar air bebas yang ditentukan. Jika agregat kasar dan halus berbeda maka perkiraan kadar air dihitung melalui rumus :

$$\text{Jumlah air pengaduk} = \frac{2}{3} \times W_f + \frac{1}{3} \times W_c$$

Keterangan : W_f = kadar air bebas agregat halus

W_c = kadar air bebas agregat kasar

2. Ikuti kurva yang sesuai dengan harga berat jenis gabungan sehingga memotong garis vertikal pada point pertama.
3. Jika dalam grafis belum ada harga berat jenis gabungan yang telah ditentukan, buat kurva yang baru yang sesuai dengan harga berat jenis gabungan yang telah ditentukan, yang sesuai dengan garis kurva terdekat. Kurva itu akan memotong vertikal harga kadar air bebas.
4. Tarik garis mendatar melalui titik potong itu. Nilai itu menunjukkan nilai berat beton segar.



Grafik 2.2. Hubungan antara berat isi campuran beton, jumlah air pengaduk, dan berat jenis SSD agregat gabungan