

BAB III

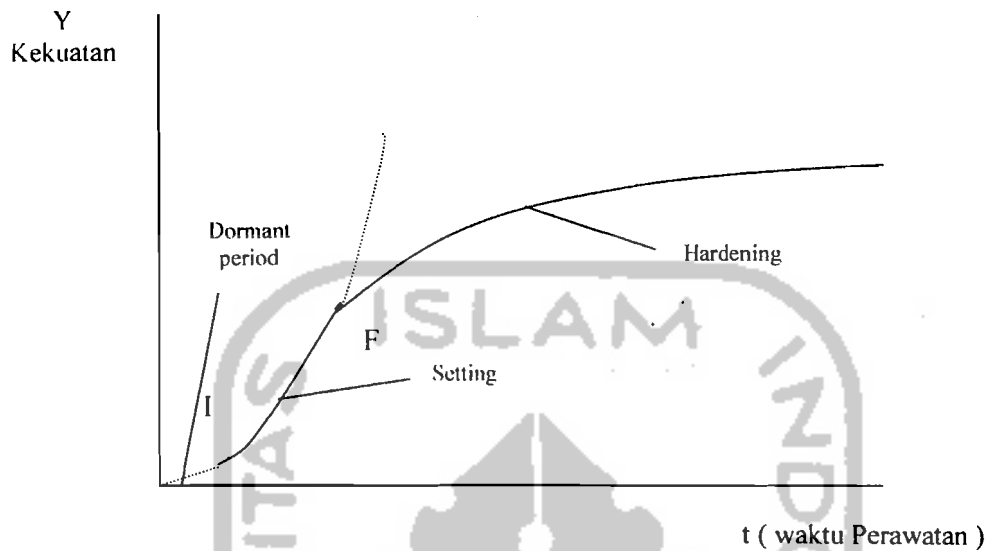
LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian beton

Beton adalah suatu material seperti batu yang didapatkan dengan cara pencampuran yang teliti antara semen, pasir, kerikil, atau agregat lain dan air untuk mengeras dalam rangka memperoleh bentuk dan ukuran struktur yang diinginkan (Tjokrodimulyo, 1995). Bagian terbesar dari bahan – bahannya adalah agregat yang baik dan pilihan. Semen dan air bereaksi kimia untuk melekatkan partikel – partikel agregat menjadi massa yang padat. Air tambahan dibutuhkan untuk penyempurnaan reaksi kimia.

3.1.1 Proses hidrasi pada semen Portland

Ketika semen Portland di campur dengan air, maka partikel semen akan menjadi sebuah fase cair atau pasta. Hasil dari pasta semen dapat dilihat segera setelah pencampuran dan akan bertahan untuk waktu yang disebut dengan "*dormant period*". Setelah dua sampai tiga jam dengan kondisi normal, pasta semen mulai mengeras dan kondisi plastis mulai berkurang dan akhirnya hilang, pasta semen menjadi getas (*brittle*). Proses pengerasan ini disebut dengan "*setting process*" yang terjadi setelah beberapa jam setelah pencampuran selesai (S. Popovich, 1992). Lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Proses Hidrasi semen Portland.

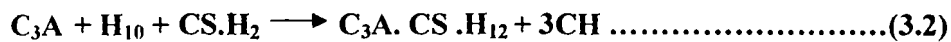
Setting process dan pengerasan pasta semen Portland adalah hasil dari reaksi kimia yang simultan dan teratur antara air dan bahan penyusun semen, reaksi ini disebut dengan proses hidrasi. Ada dua proses reaksi kimia penting selama periode awal dari proses hidrasi, yaitu :

1. Reaksi antara C_3A dan *gypsum* dari semen menghasilkan *ettringite*, yaitu *kalsium* dan *alluminate trisulfate hydrate*.
2. Hidrasi dari semen dan air menghasilkan *calcium silicate hydrate* (CSH).

Kalau dibuat persamaan reaksi kimia yang disederhanakan menjadi sebagai berikut,



$C_3S_2H_3$ yang ditunjukkan oleh sebuah senyawa CSH atau yang lebih dikenal dengan *tobermorite gel*.



Disisi kanan dari persamaan 3.2 adalah *calcium alluminate monosulphate hydrate* (Bruner dan Copeland, 1964). Fase *monosulphate* dapat juga merupakan pengembangan dari *calcium alluminate trisulphate hydrate* (*ettringite*) yang terbentuk setelah fase awal dari hidrasi (Mehta, 1993). Indikasi dari proses hidrasi dari *dua calcium silicate* bereaksi dengan C_3A , yang berfungsi sebagai katalis pada hidrasi dari *silicate*. Mekanisme yang mungkin adalah C_3A membuat struktur dari pengembangan gel CSH (Popovich, 1992).

Kekuatan semen yang telah mengeras tergantung pada jumlah air yang dipakai waktu hidrasi berlangsung. Pada dasarnya jumlah air yang diperlukan untuk proses hidrasi hanya sekitar 25 % dari berat semennya, penambahan jumlah air akan mengurangi kekuatan beton (Winter and Nelson, 1991).

Beton dapat mempunyai rentang kekuatan yang lebar yaitu dapat diperoleh dengan cara mengatur secara tepat proporsi dari material – material pokok. Semen khusus, agregat khusus, bahan tambah dan metode Perawatan yang khusus menjadikan banyak variasi dari beton akan diperoleh.

3.1.2 Mekanisme proses hidrasi

Hidrasi adalah proses reaksi yang berkelanjutan antara semen dan air, atau lebih tepatnya disebut fase cair, yang dimulai dari permukaan partikel semen, kemudian dengan berjalannya waktu reaksi bergerak secara bertahap lebih ke

bagian dalam dari partikel semen, air bereaksi dengan partikel semen dan memisahkan diri dari partikel – partikel semen menjadi gel yang mengitari bagian partikel semen yang tak terhidrasi (Popovich, 1992).

Pengembangan kekuatan dari semen sangat kompleks, oleh karena itu mekanisme hidrasi hanya dibuat perkiraan saja. Menurut Popovich, mekanisme hidrasi terdiri dari beberapa tahap antara lain :

1. Tahap *zero stage*, yaitu ketika permulaan semen dan air pertama terjadi kontak.
2. Tahap *first stage*, yaitu kelanjutan dari tahap pertama ketika gel dari hasil prose hidrasi mulai menempel pada permukaan partikel semen dalam jumlah yang banyak, kemudian membuat lapisan pelindung untuk mencapai bagian dari semen yang belum terhidrasi dan pada tahap ini membutuhkan cukup banyak air untuk semua proses reaksi tersebut.
3. Tahap *second stage*, yaitu proses setelah tahap *first stage*, ketika lapisan gel menjadi begitu tebal yang menempel pada permukaan partikel semen. Pada tahap ini reaksi menjadi lebih lambat.

Waktu untuk proses *zero stage* dan *first stage* sangat tergantung dari kesemua proses tersebut, lebih khusus ketika proses hidrasi berlangsung cepat, misalnya menggunakan Perawatan temperatur tinggi (uap), mengandung partikel semen C_3S dan C_3A yang tinggi, maka waktu dari *first stage* mungkin akan terjadi sekitar satu minggu atau kurang, sedangkan pada proses hidrasi yang lambat paling tidak membutuhkan waktu beberapa bulan (Popovich, 1992).

3.1.3 Porositas pasta semen

Bentuk dan ukuran porositas pasta semen mempunyai efek penting pada property beton yang dihasilkan setelah proses hidrasi seperti yang telah diuraikan di atas. Porositas pasta semen sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan keawetan (*durability*) beton (Popovich, 1992).

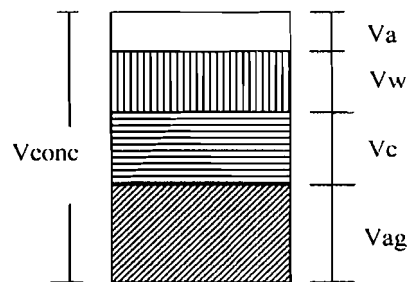
Porositas pasta semen terdiri dari pori – pori kecil (*micro capillary*) dan besar (*macro capillary*). Pori – pori kecil meliputi kandungan udara dan pori – pori kapiler sedangkan pori – pori besar meliputi pori – pori gel. Ada dua aspek dalam penambahan pori – pori kapiler dan kandungan udara, yaitu :

- 1) Dua bentuk awal dari porositas adalah berbeda. Kandungan udara dalam pasta semen adalah hasil konsolidasi tidak komplet atau memang ditambahkan.
- 2) Volume awal dari kandungan udara (V_a) mengandung konstanta pokok selama umur pasta semen ataupun beton.

Berikut akan diuraikan porositas pasta semen untuk kondisi pasta semen segar dan setelah pasta semen mengeras.

1. Pasta semen segar (*fresh paste cement*)

Skema dari komposisi pasta semen segar atau beton segar dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Komposisi dalam beton segar

dengan : V_{conc} = volume beton

V_a = volume udara

V_w = volume air

V_c = volume semen

V_{ag} = volume agregat

Secara praktis kandungan udara untuk berbagai umur beton (pasta semen) adalah sama, tetapi volume pori – pori kapiler (V_w) berkurang dengan berjalannya umur beton dalam kondisi normal (Popovich, 1992). Total volume kandungan pasta semen segar dapat dihitung dengan persamaan dari teknologi beton antara lain :

$$1) \quad V_c + V_{ag} + V_w + V_a = V_{conc} \dots\dots\dots(3.3)$$

dengan : V_c dan V_{ag} = Volume absolut dari semen dan agregat dalam beton

V_w dan V_a = volume dari udara dan air dalam beton

V_{conc} = volume sampel beton

$$2) \quad W_c + W_{ag} + W_w = W_{conc} \dots\dots\dots(3.4)$$

dengan : W = berat semen, agregat dan air dalam sampel beton

Dengan : P_o = porositas total awal, 100 %

V = volume pasta semen segar termasuk kandungan udara

$p'_o = p''_o$ = kuantitas relatif dari volume udara dan air (%)

Porositas udara atau yang disebut dengan kandungan udara dalam pasta semen ditunjukkan dalam bentuk persamaan relatif sebagai berikut.

$$a = 100 p'_o = 100 \left(1 - \frac{U_a}{U_o} \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

$$= 100 \left(1 - \frac{U_a \frac{w/c + 1/G_c}{w/c + 1}}{U_o} \right) \dots\dots\dots (3.7)$$

dengan : a = kandungan udara, % volume

U_a = berat per unit pasta semen, g/cm^3

U_o = berat per unit pasta semen dihitung pada keadaan bebas udara, g/cm^3

W = massa air dalam spesimen segar

C = massa dari semen

w/c = rasio air semen

G_c = gravitasi dari semen

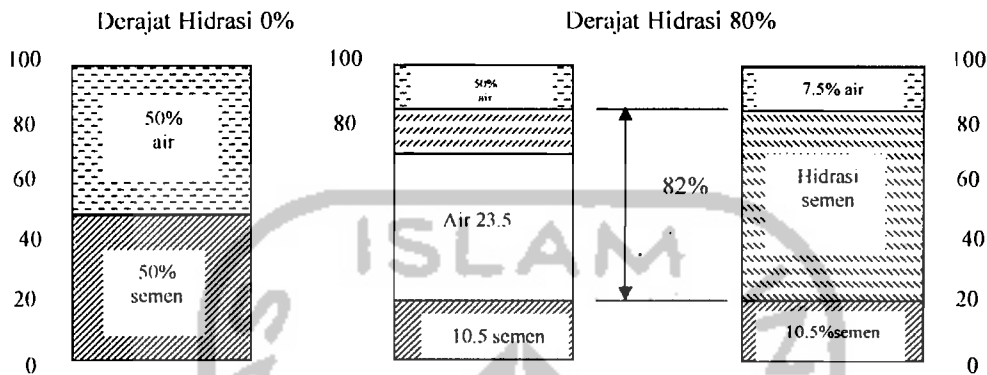
2. Pasta semen yang telah mengeras

Pengembangan hasil hidrasi dimulai saat pori –pori kapiler bertambah secara bertahap sejak pencampuran selesai walaupun sesungguhnya perubahan volume tidak besar yang tergantung dari proses. Pengurangan proses porositas kapiler tergantung dari beberapa kondisi berikut ini.

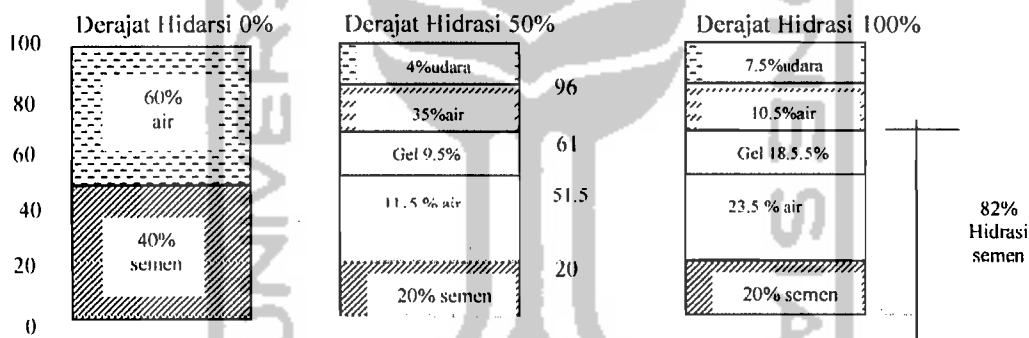
- 1) Tidak ada lagi semen yang tak terhidrasi tersedia untuk hidrasi.
- 2) Tidak ada cukup air tersedia.

3) Semua pori – pori kapiler telah terisi oleh hasil hidrasi.

Pada Gambar 3.2 dan 3.4 berikut ini dapat dilihat skema dari dua tahap hidrasi pasta semen dengan pemadatan penuh untuk rasio air semen 0.32 dan 0.48.



Gambar 3.3 Skema persentase hidrasi pasta semen dengan rasio air semen 0.32



Gambar 3.4 Skema persentase hidrasi pasta semen dengan rasio air semen 0.48

Sisa porositas (p) didalam pasta keras dapat dihitung pada beberapa tahap hidrasi sejak porositas awal (po) ditambah ruang yang dibentuk oleh

$$p = \frac{V_w + V_a + V_p - V_h}{V} = \frac{p_o - V_h - V_p}{V} \dots\dots\dots (3.8)$$

Dengan : P = Porositas

Po = porositas awal

Vp = Volume semen Portland yang telah digunakan untuk hidrasi

V_h = Volume padat hasil hidrasi

Tetapi dalam kenyataannya hasil hidrasi padat sesungguhnya hanya kontribusi dari gel semen yang berpengaruh terhadap pengembangan kekuatan pasta semen, maka persamaan 3.8. menjadi :

$$p = \frac{V_w + V_a + V_p - V_g}{V} \dots\dots\dots (3.9)$$

Dengan V_g = gel semen

Karakter porositas didalam pasta keras secara numeris tergantung pada ruang yang tersedia untuk diisi oleh gel semen. Rasio ruang-gel (X_r) dapat dihitung dengan rumus :

$$X_r = \frac{V_g}{V_w + V_a + V_p} \dots\dots\dots (3.10)$$

Nilai X_r antara 0 – 1, bila $X_r = 1$ secara teoritis semua pori kapiler dan kandungan udara telah terisi komplet oleh semen gel. Sejauh mana proses hidrasi telah berkembang dapat dilihat dari derajat hidrasinya (α). Jika $\alpha = 0$ berarti tidak ada reaksi yang terjadi antara semen dan air dan $\alpha = 1$ berarti 100 % semen telah terhidrasi. Derajat hidrasi dapat dihitung dengan persamaan matematika berikut :

$$\alpha = \frac{\text{Jumlah dari gel-semen yang terbentuk}}{\text{Jumlah dari gel semen yang telah terhidrasi}} \dots\dots\dots (3.11)$$

Tetapi tidak ada metode yang memuaskan tersedia untuk penentuan langsung dari jumlah semen-gel didalam specimen. Maka untuk pendekatan praktis derajat hidrasi dapat dihitung dengan ,

$$\alpha = 1 - \frac{\text{Jumlah semen tak terhidrasi}}{\text{Jumlah semen awal}} \dots\dots\dots (3.12)$$

3.2 Bahan penyusun beton

Bahan – bahan penyusun beton terdiri dari semen, air dan agregat (kasar dan halus). Untuk lebih jelasnya akan diuraikan di bawah ini.

3.2.1 Semen Portland

Semen sudah umum digunakan paling tidak sejak dua ribu tahun yang lalu oleh Bangsa Romawi sudah banyak menggunakan bahan ini pada proyek konstruksi mereka bahkan banyak diantaranya masih berdiri. Semen yang mereka gunakan adalah semen alami dan semen pozzolan, dibuat dari campuran batu gamping dan lempung serta dari campuran kapur mati dengan abu vulkanik yang mengandung silica.

Semen Portland modern dibuat dari beberapa bahan yang mempunyai proporsi yang tepat antara batu kapur, silica, allumina dan besi serta sebagian kecil magnesia dan sulfur trioksida (Smith and Andres, 1989).

Semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara membakar bersama – sama : kapur, silica dan alumina pada suhu $\pm 1500^{\circ}C$ yang menjadi klinker. Kemudian klinker – klinker ini didinginkan dan dihaluskan sampai menjadi bubuk. Biasanya lalu ditambahkan gips atau kalsium sulfat sebagai bahan pengontrol waktu ikat. Bahan tambang lain kadang – kadang ditambahkan untuk membentuk semen khusus, misalnya kalsium klorida untuk menjadikan semen cepat mengeras (Tjokrodimulyo, 1995).

Semen Portland dibuat dengan melalui beberapa langkah, sehingga menjadikan semen sangat halus dan memiliki sifat adhesif maupun kohesif.

Di Indonesia semen dibagi menjadi 5 jenis (PUBLI – 1982), yaitu :

1. Jenis I yaitu semen Portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan – persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis lain.
2. Jenis II yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.
3. Jenis III yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan kekuatan awal tinggi.
4. Jenis IV yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan panas hidrasi rendah.
5. Jenis V yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan sangat tahan sulfat.

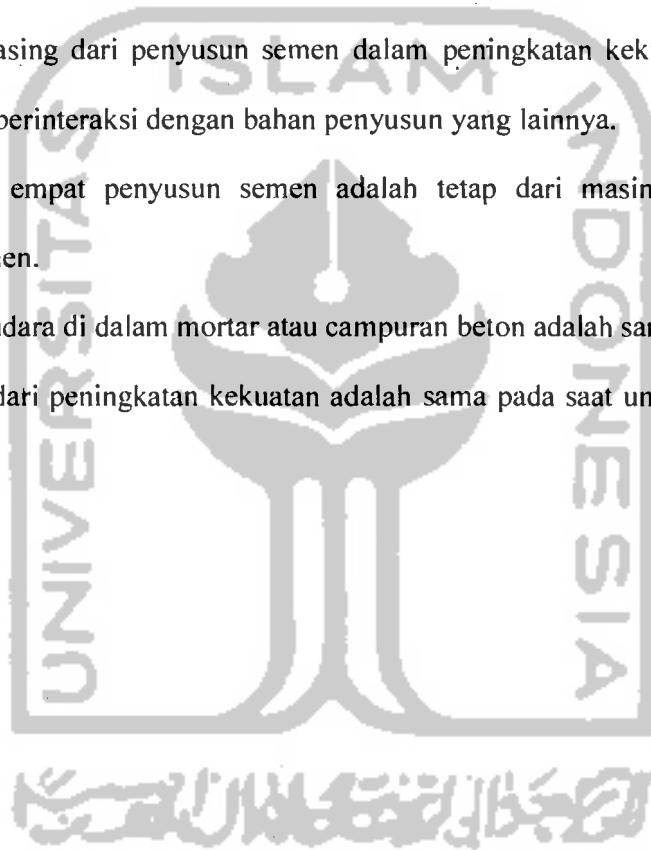
Efek dari komposisi penyusun semen terhadap peningkatan kekuatan beton dapat di buat pendekatan dengan model matematika. Model matematika ini merupakan pendekatan dari bermacam – macam hipotesa semen yang di dalamnya terdiri banyak faktor yang berpengaruh terhadap hidrasi semen dan pengerasan nyata pasta semen. Model matematika ini penting untuk pemilihan jenis semen, karena sangat berhubungan dengan komposisi dan property semen yang berpengaruh terhadap kekuatan beton yang dihasilkan. Pendekatan model matematika menurut Popovich untuk empat penyusun pokok semen, yaitu:

$$f = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \dots\dots\dots(3.13)$$

Dengan f = kekuatan beton

a, b, c dan d adalah koefisien yang mewakili kontribusi 1 % dari penyusun semen untuk peningkatan kekuatan beton dapat dilihat pada table 3.1. Persamaan tersebut dapat dipakai dengan asumsi sebagai berikut :

1. Hanya empat penyusun semen yang mempunyai kontribusi terhadap peningkatan kekuatan, Perawatan dan kondisi saat tes serta kandungan SO_3 tidak berubah.
2. Masing – masing dari penyusun semen dalam peningkatan kekuatan berdiri sendiri tanpa berinteraksi dengan bahan penyusun yang lainnya.
3. Jumlah dari empat penyusun semen adalah tetap dari masing – masing penyusun semen.
4. Kandungan udara di dalam mortar atau campuran beton adalah sama.
5. Mekanisme dari peningkatan kekuatan adalah sama pada saat umur awal dan akhir beton.



Tabel 3.1 Koefisien penyusun beton untuk berbagai umur beton

Umur	1 hari	3 hari	7 hari	28 hari	3 bulan	1 tahun	2 tahun
Senyawa 1:2.75 Standar Ottawa Sand Plastic Mortar Kuhus dia. 2 in untuk Kuat desak (psi)							
C ₃ S	8.5 ± 0.40	27.4± 0.98	40 ± 1.47	48.8± 3.10	55.7± 3.67	61.8± 4.10	70.7 ± 4.05
C ₂ S	0.3 ± 0.37	-1.1± 0.91	-5.1± 0.91	19.1± 2.28	62.9± 3.41	80.6± 3.81	82.2± 4.13
C ₃ A	11.3± 1.11	24.1± 2.74	58.4± 4.11	100.1±8.67	56.4± 10.2	85.6±11.47	12.5±11.43
C ₄ AF	-6.5± 1.26	-9.8± 3.12	-0.2± 4.68	30.8 ± 9.88	39.7±11.71	39.6±13.07	27.2±13.12
1 : 3 Standar Ottawa Sand Brigquets for Tensile Strength (psi)							
C ₃ S	2.1 ± 0.14	3.6 ± 0.10	4.6 ± 0.21	5.0 ± 0.2	4.7 ± 0.17	4.6 ± 0.26	4.9 ± 0.23
C ₂ S	0.3 ± 0.13	0.8 ± 0.18	1.3 ± 0.19	3.8 ± 0.18	6.1 ± 0.16	6.4 ± 0.25	6.1 ± 0.24
C ₃ A	4.6 ± 0.39	6.3 ± 0.54	7.0 ± 0.57	7.1 ± 0.55	4.4 ± 0.48	2.1 ± 0.74	0.9 ± 0.65
C ₄ AF	0.4 ± 0.45	3.7 ± 0.62	3.5 ± 0.63	4.0 ± 0.63	4.0 ± 0.55	2.6 ± 0.84	2.2 ± 0.74

3.2.2 Air

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting namun harganya paling murah. Air diperlukan untuk bereaksi dengan semen serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir – butir agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan. Untuk bereaksi dengan semen, air yang dibutuhkan hanya sekitar 25 % dari berat semen, namun kenyataannya nilai factor air semen yang dipakai sulit kurang dari 0,35 kelebihan air ini dipakai sebagai pelumas. Tetapi perlu dicatat bahwa tambahan air sebagai pelumas ini tidak boleh terlalu banyak karena akan mengurangi kekuatan beton serta menjadikan beton porous. Selain kelebihan air akan bersama – sama dengan semen bergerak kepermukaan adukan beton segar yang baru saja dituang (*bleeding*) yang kemudian menjadi buih dan merupakan

suatu lapisan tipis yang dikenal dengan *laitance*. Selaput tipis ini akan mengurangi lekatan antara lapis-lapis beton dan merupakan bidang sambung yang lemah. Apabila ada kebocoran cetakan, air bersama – sama semen juga akan keluar sehingga terjadilah sarang – sarang kerikil.

Secara umum air yang dapat dipakai dalam bahan campuran beton adalah air yang bila dipakai akan dapat menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90 % kekuatan beton yang memakai air suling.

Air mempunyai pengaruh yang penting dalam pembentukan pasta semen yang berpengaruh pada sifat mudah dikerjakan (*Workability*), kekuatan, susut dan keawetan mortarnya dan kebutuhan air dalam pembuatan beton meningkat sejalan dengan meningkatnya temperatur .

Dalam pemakaian air untuk beton, sebaiknya memenuhi syarat – syarat :

1. tidak mengandung Lumpur atau benda melayang lainnya lebih dari 2 gram/liter,
2. tidak mengandung garam – garaman yang dapat merusak beton (asam, zat organic dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter,
3. tidak mengandung khlorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter dan
4. tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

3.2.3 Agregat

Aregat ialah butiran mineral alami yang berisi bahan pengisi dalam campuran beton. Agregat dalam campuran beton jumlahnya berkisar antara 70%-75% dari volume beton (Kardiyono, 1995).

Agregat akan sangat berpengaruh terhadap kekuatan beton sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan beton karena semen dan air tidak memberikan andil yang cukup besar pada kekuatan beton dan pada umumnya pemilihan agregat yang baik akan menghasilkan beton dengan kekuatan yang baik, lebih tahan terhadap cuaca serta ekonomis.

Faktor-faktor dari agregat yang berpengaruh terhadap kuat desak beton yaitu: bentuk agregat, tekstur permukaan butiran, berat jenis jenis agregat, ukuran maksimum butir agregat, gradasi agregat, modulus halus butir, kadar air agregat kekuatan agregat yang akan dijelaskan seperti berikut ini.

1. Bentuk agregat

Sifat-sifat dan tekstur permukaan dari butir-butir agregat sebenarnya belum teridentifikasi dengan jelas, sehingga sifat-sifat tersebut sulit diukur dengan baik dan pengaruhnya terhadap beton sulit diperiksa dengan teliti.

Bentuk butir ditentukan oleh dua sifat yang tidak saling tergantung, yaitu kebulatan dan sferikal.

Kebulatan atau ketajaman sudut ialah sifat yang dimiliki butir yang tergantung pada ketajaman relatif dari sudut dan ujung butir sedangkan sferikal ialah sifat yang tergantung pada rasio antara luas bidang permukaan butir dan volume butir.

Bentuk butiran agregat lebih berpengaruh pada segar daripada setelah beton mengeras. Berdasarkan bentuk butiran agregat dapat dibedakan menjadi empat macam yaitu: agregat bulat, agregat bulat sebagian, agregat bersudut,

agregat panjang dan agregat pipih. Bentuk butiran tersebut akan diterangkan berikut ini.

- a. Agregat bulat adalah agregat yang mempunyai rongga udara minimum 33 persen oleh karena itu mempunyai resiko permukaan-volume yang kecil sehingga hanya memerlukan pasta semen yang sedikit untuk menghasilkan beton yang baik, tetapi ikatan antara butir-butirnya kurang kuat untuk beton mutu tinggi dan perkerasan jalan raya.
- b. Agregat bulat sebagian mempunyai rongga skitar 35 sampai 35 persen sehingga membutuhkan pasta semen. Ikatan antar butirnya lebih baik daripada agregat bulat tetapi tidak cocok untuk beton mutu tinggi.
- c. Agregat bersudut mempunyai rongga antara 38 sampai 40 persen. Ikatan antar butirnya baik sehingga membentuk daya lekat yang baik dan membutuhkan pasta semen yang banyak tetapi dapat digunakan untuk beton mutu tinggi maupun perkerasan jalan.
- d. Agregat panjang jika ukuran terbesarnya lebih dari $9/5$ ukuran rata-rata. Ukuran rata-rata agregat ialah rata-rata ukuran dalam ayakan yang meloloskan dan yang menahan butiran agregat.
- e. Agregat pipih adalah agregat yang ukuran terkecil butirannya kurang dari $3/5$ ukuran rata-ratanya.

2. Tekstur permukaan butiran

Tekstur permukaan ialah suatu sifat permukaan yang tergantung pada ukuran apakah permukaan butir termasuk halus atau kasar, mengkilaf atau kusam dan macam dari kekasaran permukaan. Pada umumnya permukaan butiran hanya

disebut sebagai kasar, agak kasar, agak licin, licin. Tetapi berdasarkan pada pemeriksaan visual butiran agregat, tekstur permukaan butiran agregat dapat dibedakan menjadi; sangat halus (glassy), halus, granuler, kasar, berkrystal (crystalline), berpori dan berlubang-lubang.

Tekstur permukaan tergantung pada kekasaran, ukuran molekul, tekstur batuan dan juga tergantung pada besar gaya yang bekerja pada permukaan butiran yang telah membuat licin dan kasar permukaan tersebut.

Butir-butir dengan tekstur permukaan yang licin membutuhkan air lebih sedikit daripada butir-butir yang tekstur permukaannya kasar. Dilain pihak, hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis tertentu dari agregat kasar, kekasaran.

Sifat-sifat fisik agregat misalnya bentuk dan tekstur permukaan secara nyata mempengaruhi mobilitas (yaitu mudah dikerjakan) dari beton segarnya, maupun daya lekat antara agregat dan pastanya. Kuat rekatan antara agregat dan pasat semen tergantung pada tekstur permukaan agregat.

3. Berat jenis agregat

Agregat dapat dibedakan berdasarkan berat jenisnya, yaitu: agregat normal, agregat berat dan agregat ringan. Ketiga macam agregat tersebut akan dijelaskan di bawah ini.

- a. Agregat normal ialah agregat yang berat jenisnya antara $2,5 - 2,7 \text{ gr/cm}^3$.

Agregat ini biasanya berasal dari granit, basalt dan kuarsa. Beton yang dihasilkan berberat jenis sekitar $2,3 \text{ gr/cm}^3$ dengan kuat tekan antara 15 Mpa sampai 40 Mpa.

- b. Agregat berat ialah agregat yang berat jenisnya lebih dari $2,8 \text{ gr/cm}^3$ misalnya magnetik, barytes (BaSO_4) dan serbuk besi (Fe_3O_4). Beton yang dihasilkan berat jenisnya tinggi yang efektif sebagai dinding pelindung radiasi sinar X.
- c. Agregat ringan ialah yang mempunyai berat jenis kurang dari $2,0 \text{ gr/cm}^3$ yang biasanya dibuat untuk non struktural akan tetapi bisa juga untuk beton struktural atau blok dinding tembok.

4. Ukuran maksimum butir agregat

Adukan beton dengan tingkat kemudahan pengerjaan yang sama atau beton dengan kekuatan yang sama, akan membutuhkan yang lebih sedikit apabila dipakai butir-butir kerikil yang besar-besar. Oleh karena itu, untuk mengurangi jumlah semen (sehingga biaya pembuatan beton berkurang) dibutuhkan ukuran butir-butir maksimum agregat yang sebesar-besarnya. Pengurangan jumlah semen ini juga berarti pengurang panas hidrasi dan ini berarti mengurangi kemungkinan beton untuk retak susut atau perbedaan panas yang besar. Walaupun demikian, besar butir maksimum agregat tidak dapat terlalu besar karena ada faktor-faktor lain yang membatasi. Faktor-faktor tersebut adalah:

- a. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{3}{4}$ kali bersih jarak antar baja tulangan atau antara baja tulangan dan cetakan,
- b. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{1}{3}$ kali tebal plat, dan
- c. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh lebih besar dari $\frac{1}{5}$ kali jarak terkecil antara bidang samping cetakan.

5. Gradasi agregat

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang sama volume pori akan besar sebaliknya bila butir-butirnya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil.

Pada agregat untuk pembuatan beton digunakan butiran yang kemampatannya tinggi karena volume porinya sedikit dan ini berarti hanya membutuhkan bahan ikat sedikit saja.

Modulus halus butir ini didefinisikan sebagai jumlah persen kumulatif dari butir-butir agregat yang tertinggal di atas suatu ayakan dan kemudian dibagi 100. Susunan lubang ayakan itu ialah: 38mm, 19mm, 9,6mm, 4,8mm, 2,4mm, 1,20mm, 0,6mm, 0,3mm dan 0,15mm.

Semakin besar nilai modulus halus butir menunjukkan bahwa makin besar butir-butir agregatnya. Modulus halus butir selain untuk menjadi ukuran kehalusan butir juga dapat dipakai untuk mencari nilai perbandingan berat antara pasir dan kerikil bila kita akan membuat campuran beton.

6. Kadar air agregat

Air yang ada pada suatu agregat perlu diketahui untuk menghitung jumlah air yang diperlukan dalam campuran adukan beton dan juga untuk mengetahui berat satuan agregat. Keadaan kandungan air di dalam agregat dibedakan atas 4 macam yaitu: kering tungku, kering udara, jenuh kering muka dan basah. Keadaan kandungan air agregat tersebut akan dijelaskan di bawah ini.

a. Kering tungku

Benar-benar tidak berair dan ini berarti dapat secara penuh menyerap air.

b. Kering udara

Butir-butir agregat yang kering permukaannya tetapi mengandung sedikit air di dalam porinya. Oleh karena itu agregat dalam kondisi ini masih dapat menghisap sedikit air.

c. Jenuh kering muka

Pada tingkat ini tidak ada air di permukaan tetapi butir-butirnya berisi air sejumlah yang dapat diserap, dengan demikian butiran-butiran agregat pada tahap ini tidak menyerap dan tidak juga menambah jumlah air bila dipakai dalam campuran adukan beton.

d. Basah

Pada tingkat ini butir-butir mengandung banyak air baik di dalam maupun di permukaan butirannya sehingga bila dipakai untuk campuran akan memberi air.

7. Kekuatan agregat

Kekuatan beton tidak lebih tinggi daripada kekuatan agregatnya. Oleh karena itu sepanjang kuat tekan agregat lebih tinggi daripada beton yang dibuat dari agregat tersebut maka agregat tersebut masih dianggap cukup kuat.

Butir-butir agregat yang lemah, yaitu butir-butir yang kekuatannya lebih rendah daripada pasta semen yang telah mengeras, tidak dapat menghasilkan beton yang kekuatannya dapat diandalkan. Akan tetapi untuk butir-butir agregat yang kekuatannya sedang atau cukup mempunyai kuat tekan yang sedang, mungkin malahan dapat menguntungkan karena dapat mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada pasta beton selama pembebanan, pembasahan,

pengeringan, atau pemanasan serta pendinginan, dengan demikian membantu mengurangi bahaya akibat terjadinya retakan dalam beton.

Dalam praktek agregat umumnya digolongkan menjadi 3 kelompok, yaitu: batu, kerikil dan pasir yang akan dijelaskan berikut ini.

1. Batu

Batu adalah agregat dengan ukuran butiran lebih besar dari 40 mm dan dapat dibedakan menjadi 3 kategori umum berdasarkan keadaan geologi aslinya, yaitu: batuan beku, batuan sedimen dan batuan metamorfosis.

2. kerikil

Kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu dengan ukuran 5-40 mm. Adapun persyaratan kerikil sebagai agregat adalah:

- a. butir-butirnya tajam, kuat dan bersudut,
- b. tidak mengandung tanah atau kotoran,
- c. harus tidak mengandung garam yang menghisap air dari udara,
- d. harus yang benar-benar tidak mengandung zat organis,
- e. harus mempunyai variasi besar butir (gradasi) yang baik sehingga rongganya sedikit,
- f. bersifat kekal, tidak hancur atau berubah karena cuaca,
- g. tidak boleh mengandung butiran-butiran yang pipih dan panjang lebih dari 20% dari berat keseluruhan.

3. Pasir

Pasir merupakan bahan batuan berukuran kecil, ukuran butiranya ≤ 5 mm. Pasir dapat berupa pasir alam, pasir buatan, pasir galian.

Untuk mendapatkan nilai kuat desak yang lebih besar maka digunakan pasir dengan gradasi yang lebih besar. Variasi besar butiran (gradasi) yang baik akan menghasilkan rongga mortar yang lebih sedikit. Pasir seperti ini hanya memerlukan pasta semen yang sedikit.

Volume pasir biasanya mengembang bila sedikit mengandung air. Pengembangan volume itu disebabkan karena adanya lapisan tipis air disekitar butir-butir pasir. Ketebalan lapisan air itu bertambah dengan bertambahnya kandungan air dalam pasir dan ini berarti pengembangan volume secara keseluruhan. Akan tetapi pada suatu kadar air tertentu volume pasir mulai berkurang dengan bertambahnya kadar air. Pada suatu kadar air tertentu pula, besar penambahan volume pasir itu menjadi nol berarti volume pasir menjadi sama dengan volume pasir kering.

3.3 Kekentalan adukan beton

Dalam pembuatan beton, bagian pekerjaan yang tidak kalah pentingnya selain perawatan dalam pencapaian kekuatan tekan beton yang baik adalah pemadatan. Jika beton tidak dipadatkan dengan sempurna maka sejumlah gelembung udara mungkin akan terperangkap dan mengakibatkan rongga-rongga udara pada beton setelah mengeras dan ini akan mengakibatkan pengurangan kekuatan tekannya karena beton dengan rongga minimal adalah terpadat dan terkuat.

Dengan menggunakan jumlah air yang minimal konsisten dengan derajat *workability* yang dibutuhkan untuk memberikan kepadatan maksimal.

Workability

(sifat mudah dikerjakan) merupakan tingkat kemudahan beton segar untuk diaduk, dituang, dan dipadatkan. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan adalah:

1. gradasi agregat,
2. bentuk partikel agregat,
3. pengaruh kombinasi dari gradasi dan bentuk agregat,
4. pengaruh proporsi campuran, dan
5. kadar air

Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecekan/kekentalan adukan beton. Semakin cair adukan beton segar maka semakin mudah cara pengerjaannya tetapi sebaliknya jika adukan beton segar terlalu kental maka tingkat pengerjaannya akan semakin sulit. Untuk mengetahui tingkat kekentalan adukan beton biasanya dilakukan dengan percobaan *slump*.

Untuk menentukan besarnya nilai *slump* pada umumnya digunakan alat-alat corong baja dan tongkat seperti penjelasan berikut ini.

1. Corong baja yang berbentuk kerucut berlubang pada kedua ujungnya. Bagian bawah berdiameter 20 cm dan bagian atas berdiameter 10 cm serta tinggi 30 cm disebut kerucut Abrams.
2. Tongkat baja dengan diameter 16 mm dan panjang 60 cm yang bagian ujungnya dibulatkan.

Pelaksanaan percobaan *slump* ini mula-mula corong baja ditaruh di atas tempat yang rata dan tidak menghisap air, dengan diameter yang besar berada dibawah. Adukan beton dimasukan kedalam corong tersebut kira-kira sebanyak $\frac{1}{3}$ volume corong. Setelah adukan dimasukan kemudian ditusuk-tusuk sebanyak 25 kali dengan tongkat baja. Kemudian adukan kedua dimasukan kedalam corong dengan volume yang sama dengan volume adukan yang pertama lalu ditusuk-tusuk kembali tetapi penusukan jangan sampai mengenai adukan yang pertama, lalu adukan ketiga dimasukan dan ditusuk pula. Bila adukan ketiga telah selesai ditusuk, lalu permukaan adukan beton diratakan hingga rata dengan permukaan corong. Setelah itu ditunggu 60 detik dan kemudian corong ditarik lurus keatas. Ukur penurunan permukaan atas adukan beton setelah ditarik. Besar penurunan adukan beton tersebut disebut *slump*.

Dari penurunan nilai *slump* dapat dibedakan atas tiga jenis, yaitu:

1. *Slump* sebenarnya,
2. *Slump* geser, dan
3. *Slump* jatuh

3.4 Susut pada beton

Karena beton kehilangan kelembapanya karena penguapan, maka beton akan menyusut. Karena kelembapan tidak pernah meninggalkan beton seluruhnya secara seragam, perbedaan –perbedaan kelembapan mengakibatkan terjadinya tegangan-tegangan internal dan susut yang berbeda. Tegangan-tegangan yang

disebabkan oleh perbedaan sudut dan cukup besar dan ini merupakan salah satu alasan perlunya kondisi-kondisi perawatan yang basah.

Dalam beton biasa, besarnya susut akan tergantung kepada keterbukaan dan beton itu sendiri. Keterbukaan terhadap angin sangat memperbesar kecepatan susut, atmosfer yang lembab akan mengurangi susut dan kelembaban yang rendah akan menambah susut.

3.5 Perencanaan campuran beton

Perencanaan campuran beton yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan metode ACI (*Amerika Concrete Institute*). Adapun 7 langkah perencanaan dengan metode ACI adalah sebagai berikut ini.

1. Menghitung kuat desak rata-rata, berdasarkan kuat desak yang diisyaratkan (kuat desak karakteristik) dan nilai margin yang tergantung dari tingkat pengawasan mutunya. Nilai margin adalah:

$$M = 1,64.S_d$$

Dengan S_d adalah nilai deviasi standar yang diambil dari tabel. 3.4. Kuat desak rata-rata dihitung dari kuat desak yang diisyaratkan ditambah margin.

$$\sigma''_{br} = \sigma'_{bk} + m$$

dengan σ''_{br} = Kuat desak rata-rata, (MPa)

σ'_{bk} = Kuat desak yang diisyaratkan, (MPa) dan

m = Nilai margin, (MPa)

Tabel 3.4 Nilai Deviasi Standar (MPa)

Volume Pekerjaan		Mutu Pelaksanaan		
	m ³	Baik sekali	Baik	Cukup
Kecil	< 1000	4,5 < s ≤ 5,5	5,5 < s ≤ 6,5	6,5 < s ≤ 8,5
Sedang	1000 – 3000	3,5 < s ≤ 5,5	4,5 < s ≤ 5,5	5,5 < s ≤ 7,5
Besar	> 3000	2,5 < s ≤ 3,5	3,5 < s ≤ 4,5	4,5 < s ≤ 6,5

Sumber : Kardiyono, 1995

Atau dengan rumus:

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma' b - m)^2}{(N-1)}} \quad (3.4)$$

dengan:

S_d = deviasi standar (MPa)

σ' b = kekuatan beton dari benda uji (MPa)

σ' b_m = kekuatan tekan beton rata-rata (MPa)

$$\sigma' b_m = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma' b}{N} \quad (3.5)$$

N = Jumlah benda uji

2. Menetapkan faktor air semen berdasarkan kuat tekan desak rata-rata pada umur yang dikehendaki (lihat tabel 3.5) dan keawetannya berdasarkan jenis struktur dan kondisi lingkungan (lihat tabel 3.6). Dari kedua hasil tersebut dipilih yang paling rendah.

Tabel 3.5 Kuat desak beton untuk berbagai faaktor air semen

Faktor air semen (fas)	Kemungkinan kuat desak beton Umur 28 hari	
	Beton <i>non air entrained</i> (Kg/cm ²)	Beto(Kg/cm ²)n <i>air entrained</i>
0.360	420	340
0.450	350	280
0.540	280	225
0.630	225	185
0.720	175	140
0.810	140	115

Tabel 3.6 Faktor air semen maksimum

Kondisi	Fas
1. Beton dalam ruangan bangunan:	
a. Keadaan keliling non korosif	0,6
b. Keadaan keliling korosif, disebabkan oleh kondensasi atau uap korosi	0,52
2. Beton di luar ruangan bangunan:	
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,6
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	0,6
3. Beton yang masuk ke dalam tanah:	
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat alkali dari tanah atau air tanah	0,52
4. Beton yang kontinyu berhubungan dengan air:	
a. Air tawar	0,57
b. Air laut	0,52

3. Berdasarkan jenis strukturnya, ditetapkan nilai *slump* dan ukuran agregat berdasarkan ukuran agregat maksimum (tabel 3.7 dan tabel 3.8)

Tabel 3.7 Nilai *slump*

Pemakaian beton	Maksimum (cm)	Minimum (cm)
- Dinding, plat pondasi dan pondasi telapak bertulang,	12,5	5,0
- Pondasi telapak tidak bertulang, kaison dan struktur di bawah tanah	9,0	2,5
- Pelat, balok, kolam dan dinding	15,5	7,5
- Perkerasan jalan	7,5	5,0
- Pembetonan masal	7,5	2,5

Tabel 3.8 Ukuran agregat maksimum

Tebal maks konstruksi (cm)	Ukuran butir maks (mm)			Plat tebal dengan tulangan ringan/ tampa tulangan
	Dinding balok kolom bertulang	Dinding tak bertulang	Plat tebal dengan tulangan berat	
6,25 – 12,5	12,5 – 19,6	19,6	19,6 – 25	19,6 – 38,1
15,0 – 27,5	19,6 – 38,1	38,1	38,1	38,1 – 76,2
30,0 – 76,5	38,1 – 76,5	76,2	38,1 – 76,2	76,2
>76,5	38,1 – 76,5	150	38,1 – 76,2	76,2 - 150

Tabel 3.9 Volume air yang diperlukan tiap m³ adukan beton

SLUMP (cm)	AIR (Ltr) YANG DIPERLUKAN TIAP M ³ ADUKAN BETON UNTUK UKURAN AGREGAT MAKSIMAL (mm)							
	9,6	12,5	19,6	25	38,1	50	76,2	150
	<i>BETON BIASA NON AIR ANTRAINED</i>							
2,5 – 5,0	213	203	188	183	168	157	147	127
7,4 – 10,0	234	223	208	208	183	173	163	142
15,0 – 17,5	248	234	218	218	193	183	173	152
PERKIRAAN UDARA TERPERANGKAP (%)	3	2,5	1,5	2,0	1,0	0,5	0,3	0,2
	<i>BETON BERGELEMBUNG AIR ENTRAINED</i>							
2,5 – 5,0	188	183	168	157	147	137	127	111
7,4 – 10,0	208	198	183	173	163	152	142	122
15,0 – 17,5	218	208	208	183	173	163	152	132
PERKIRAAN UDARA TERPERANGKAP (%)	8	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0

4. Menetapkan jumlah air yang diperlukan, berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai slump yang diinginkan (lihat tabel 3.9)

5. Menghitung semen yang diperlukan berdasarkan hasil dari langkah 2 dan 4

$$\text{Berat semen} = \text{Kebutuhan air} / \text{Faktor air semen}$$
6. Menetapkan volume agregat kasar yang diperlukan persatuan volume beton.
 Berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai modulus halus agregat halusnya.

Tabel 3.10 Volume agregat kasar tiap m³adukan beton

Ukuran Maksimal (mm)	Volume kerikil tusuk kering (SSD) tiap satuan volume adukan beton untuk berbagai nilai modulus halus butir (m ³)			
	2,4	2,6	2,8	3,0
9,50	0,46	0,44	0,42	0,40
12,70	0,55	0,53	0,51	0,49
19,20	0,65	0,63	0,61	0,59
25,00	0,70	0,68	0,66	0,64
38,10	0,76	0,74	0,72	0,70
50,00	0,79	0,77	0,75	0,73
76,00	0,84	0,82	0,80	0,78
150,00	0,90	0,88	0,86	0,84

7. Menghitung volume agregat halus yang diperlukan berdasarkan jumlah air, semen dan agregat kasar yang diperlukan serta udara yang terperangkap dalam adukan beton dengan cara hitungan volume absolut.

3.6 Perawatan beton

Dalam proses pembuatan beton, setelah beton dicetak hal yang harus dilakukan adalah perawatan terhadap beton tersebut, yaitu perlakuan tertentu untuk menjaga kelembapan atau temperatur guna menghindari retakan pada beton

dan mencegah kehilangan air terlalu banyak yang diperlukan untuk proses hidrasi semen sehingga proses pengerasan semen dapat berlangsung dengan baik. Karena retakan pada beton dapat mengakibatkan kerusakan yang serius jika bahan-bahan perusak dapat mencapai tulangan (sagel, kole dan kusuma, 1993).

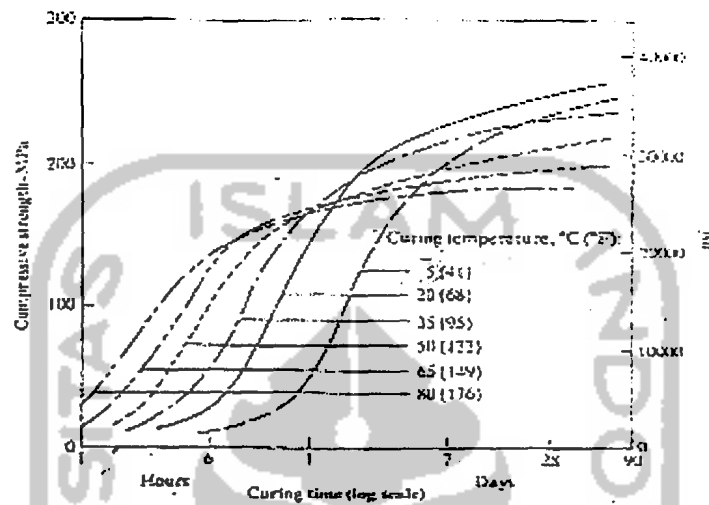
Metode perawatan beton terhadap beton yang baru dicetak dapat bermacam-macam disesuaikan dengan kondisi dilapangan, adapun jenis-jenis perlakuan yang dapat digunakan adalah:

1. dibiarkan dalam bikisting
2. menutupi dengan lembar plastik foli
3. menutupi dengan goni basah
8. mengenangi dengan air (untuk bagian struktur yang datar)
9. menyemprot/memerciki dengan air pada permukaan beton (*sprinkling*)
10. Menyemprot permukaan beton dengan *curing compound* perlakuan ini diterapkan untuk daerah yang mempunyai temperatur tinggi dan
11. *Stem curing* yaitu dengan menguapi beton supaya menjaga permukaan beton agar tetap basah dan lembab.

Pengaruh Suhu Rawatan Beton.

Secara umum, temperatur yang lebih tinggi dari beton akan berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan rata-rata awal lebih besar. tetapi akan lebih rendah untuk kekuatan jangka panjang. Bahwa hidrasi awal yang cepat menyebabkan penyebaran tidak merata dari rasta semen dengan struktur fisik pori. Kondisi ini dimungkinkan struktur menjadi lebih porous dibandingkan dengan pengembangan kekuatan dalam kondisi suhu normal. (Neville, 1987).

Pengaruh suhu rawatan beton terhadap kekuatan beton dapat dilihat pada pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Pengaruh suhu air rawatan beton terhadap kekuatan beton (Neville, 1989)

Bahwa peningkatan awal yang tinggi sampai umur beton 28 hari tetapi lebih rendah setelah umur beton 28 hari seiring dengan peningkatan suhu. Temperatur lebih tinggi menghasilkan kekuatan beton lebih tinggi selama hari pertama tetapi umur 3 sampai 28 hari keadaan berubah secara radikal, disini didapatkan temperatur optimum yang menghasilkan kekuatan maksimum.

3.7 Umur beton

Beton yang telah mengeras akan mempunyai kekuatan tekan lebih baik bersamaan dengan meningkatnya umur beton. Beton yang tidak menggunakan bahan aditif akan mempunyai kekuatan yang baik mulai pada umur 28 hari.

Sejalan dengan bertambahnya umur maka kekuatan beton akan meningkat, ini dikarenakan proses reaksi yang terjadi di dalam beton antara air dan semen semakin sempurna (Tjokrodimulyo, 1995)

3.8 Kuat desak beton

Sifat beton pada umumnya lebih baik jika kuat desaknya lebih tinggi, dengan demikian untuk meninjau mutu beton biasanya secara umum hanya ditinjau kuat tekannya saja. Adapun faktor-faktor yang sangat mempengaruhi kekuatan beton adalah:

1. Faktor air semen,
2. Umur beton,
3. Jenis semen,
4. Jumlah semen dan udara terperangkap,
5. Sifat agregat dan
6. Perawatan

Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat desak beton selengkapnya akan dijelaskan sebagai berikut ini.

1. Faktor air semen

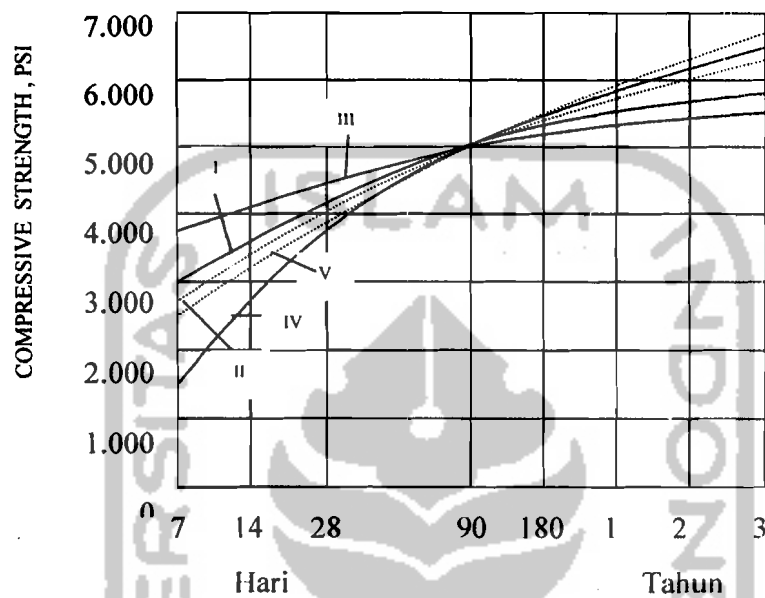
Faktor air semen (fas) ialah faktor utama yang mempengaruhi kuat desak beton.

2. Umur beton

Kuat desak beton bertambah sejalan dengan umur beton (Dunham, 1966) artinya semakin lama umur beton maka semakin besar kuat desaknya.

3. Jenis semen

Jenis semen mempengaruhi kuat desak rata-rata dan juga kuat akhir, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.12.

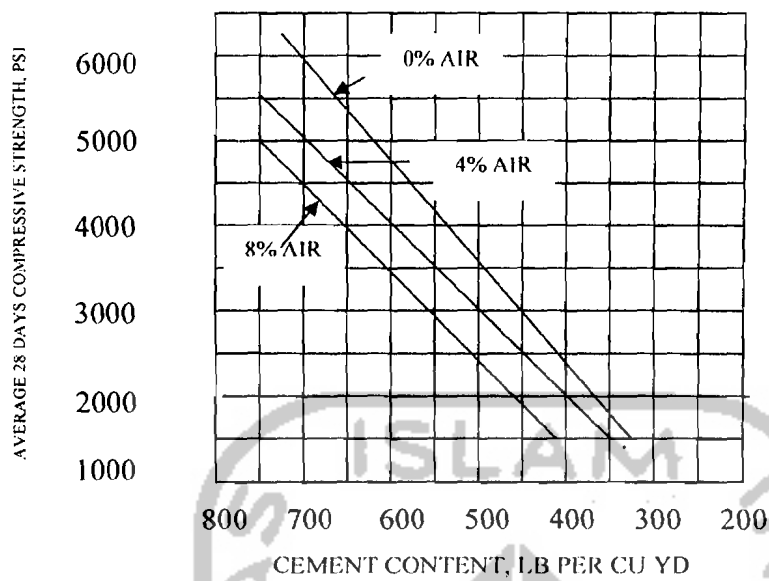


Gambar 3.12 Kuat desak rata-rata beton berdasarkan macam-macam tipe semen (Neville, 1989)

Kuat desak beton rata-rata menurut jenis – jenis semen pada Gambar 3.12 dapat dilihat bahwa kuat desak rata – rata akan mempunyai kekuatan yang sama pada umur beton 90 hari.

4. Jumlah semen dan udara terperangkap

Kuat desak beton menurun akibat adanya penurunan jumlah semen dan kuat desak tersebut akan menurun akibat banyaknya udara yang terperangkap (Merritt, 1983) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Pengaruh jumlah semen dan udara terperangkap terhadap kuat desak beton

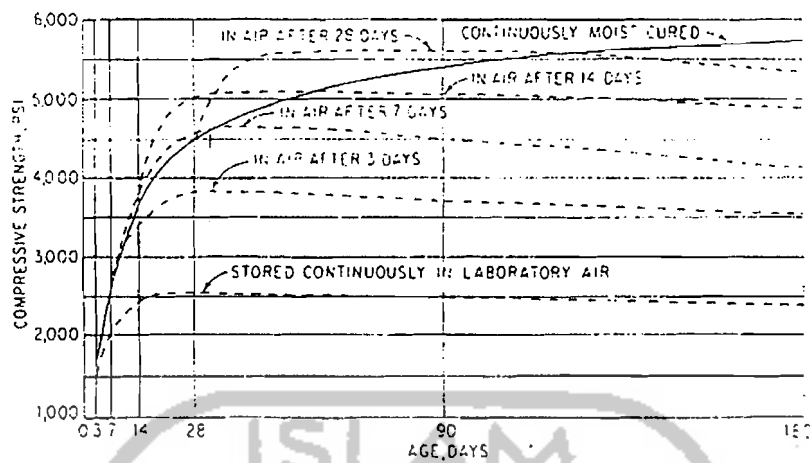
5. Jenis Agregat

Kuat desak beton tidak lebih tinggi dari kekuatan agregat dalam hal ini adalah agregat kasar. Semakin baik kekuatan agregat maka kuat desak beton akan semakin baik pula (Tjokrodimulyo, 1995)

7. Perawatan

Perawatan pada beton sangat penting untuk mendapatkan kuat desak beton yang baik. Selama reaksi hidrasi semen berlangsung kelembapan beton harus dijaga (lihat Gambar 3.14).





Gambar 3.14 Kuat desak beton berdasarkan variasi perawatan

