

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Beton**

Menurut SNI-03-2847-2002, beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat. Bahan penyusun utama dalam campuran beton adalah agregat. Agregat dalam campuran beton terdiri dari agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar yang digunakan biasanya berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. Agregat halus yang biasanya digunakan adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm.

#### **3.2 Material Penyusun Beton**

Tjokrodimuljo (1992) menyatakan bahan penyusun dalam campuran beton terdiri dari kelompok aktif dan kelompok pasif. Kelompok aktif merupakan bahan perekat atau pengikat yang terdiri dari semen, air dan bahan tambah kimia apabila digunakan. Kemudian kelompok pasif merupakan bahan pengisi yang terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil).

##### **3.2.1 Agregat**

Agregat merupakan suatu bagian penting dalam campuran beton, hal ini dikarenakan agregat menempati 70-75% dari total volume beton sehingga kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton. Antono (1988) menyatakan penggunaan agregat dalam campuran beton bermaksud untuk menghemat penggunaan semen *Portland*, menghasilkan kekuatan besar dalam beton, mengurangi susut pengerasan beton dan mengontrol *workability* adukan beton dengan gradasi yang baik.

Berdasarkan ukurannya agregat dapat dibedakan menjadi agregat kasar dan agregat halus. Menurut SNI 2847-2013 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung menyatakan bahwa agregat normal yang digunakan harus memenuhi syarat ASTM C33M. Dimensi ukuran butiran agregat dibagi menjadi beberapa kelompok yaitu, butir yang lebih dari 40 mm disebut batu, butir antara 4,8-40,00 mm disebut agregat kasar dan ukuran butir kurang dari 4,8 mm disebut agregat halus. Syarat gradasi agregat dapat dilihat pada standar ASTM C33.

### **3.2.2 Semen *Portland***

Arti kata semen adalah bahan yang mempunyai sifat adhesif maupun kohesif, yaitu bahan pengikat. Menurut Standar Industri Indonesia, SII 0013-1981, definisi semen *Portland* adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis bersama bahan-bahan yang digunakan, yaitu gypsum. Nugraha dan Antoni (2007) menyatakan semen dapat dikelompokkan menjadi 2 macam yaitu, semen hidraulis dan semen non hidraulis. Semen hidrolis adalah semen yang akan mengeras bila bereaksi dengan air, tahan terhadap air (*water resistance*) dan stabil didalam air setelah mengeras. Semen non hidraulis adalah semen yang dapat mengeras tetapi tidak stabil dalam air.

Semen *Portland* memiliki empat senyawa kimia yang utama, antara lain Trikalsium Silikat ( $C_3S$ ), Dikalsium Silikat ( $C_2S$ ), Trikalsium Aluminat ( $C_3A$ ) dan Tetrakalsium Aluminoferrit ( $C_4AF$ ). Rumus kimia senyawa ini secara tradisional ditulis dalam notasi oksida yang biasa dipakai pada kimiawi keramik, notasi pendek secara umum dipakai oleh para ahli semen (Nugraha dan Antoni, 2007).

Berdasarkan ASTM (*American Standard for Testing Material*) semen *Portland* dapat dibedakan menjadi lima tipe yaitu sebagai berikut.

1. Tipe I adalah semen *Portland* untuk tujuan umum. Jenis ini paling banyak diproduksi karena digunakan untuk hampir semua jenis konstruksi,
2. Tipe II adalah semen *Portland* modifikasi, adalah tipe yang sifatnya setengah tipe IV setengah tipe V. Belakangan banyak diproduksi sebagai pengganti tipe IV,

3. Tipe III adalah semen *Portland* dengan kekuatan awal tinggi. Kekuatan 28 hari umumnya dapat dicapai dalam 1 minggu. Semen jenis ini umum dipakai ketika acuan harus dibongkar secepat mungkin atau ketika struktur harus dapat cepat dipakai,
4. Tipe IV adalah semen *Portland* dengan panas hidrasi rendah, yang dipakai untuk kondisi dimana kecepatan dan jumlah panas yang timbul harus minimum. Misalnya pada bangunan masif seperti bendungan grafitasi yang besar. Pertumbuhan kekuatannya lebih lambat dari pada semen tipe I,
5. Tipe V adalah semen *Portland* tahan sulfat, yang dipakai untuk menghadapi aksi sulfat yang ganas. Umumnya dipakai didaerah dimana tanah atau airnya memiliki kandungan sulfat yang tinggi.

### **3.2.3 Air**

Air memiliki peranan yang penting dalam suatu campuran beton karena semen tidak dapat menjadi pasta tanpa air. Air harus selalu ada dalam campuran beton, tidak hanya untuk hidrasi semen tetapi juga untuk mengubahnya menjadi suatu pasta sehingga membuat beton menjadi lecah (*workable*). Menurut SNI-03-2847-2002, air yang digunakan dalam campuran beton harus bersih dan bebas dari bahan-bahan merusak yang mengandung oli, asam, alkali, garam, bahan organik, atau bahan-bahan lainnya yang merugikan terhadap beton atau tulangan.

Air dalam proses pembuatan beton dapat digunakan dalam pencampuran, pengerasan dan pengawetannya, oleh karena itu harus melalui pemeriksaan terlebih dahulu untuk memenuhi syarat-syarat tertentu. Hal yang perlu diperhatikan adalah kejernihan dari air, apabila ada beberapa kotoran yang terapung maka air tidak boleh dipakai. Disamping pemeriksaan visual harus juga dilakukan penelitian dilaboratorium kimia untuk memastikan air tidak mengandung bahan-bahan perusak. Selain itu harus diperhatikan juga tingkat keasaman yaitu pH air tidak boleh lebih dari 6, juga tidak dibolehkan terlalu sedikit mengandung kapur.

### 3.2.4 Pasir Besi

Pasir besi merupakan pasir dengan kandungan besi yang tinggi dan biasanya dimanfaatkan sebagai bahan baku industri logam besi. Pada umumnya pasir besi banyak ditemukan di daerah pantai, contohnya di sepanjang pantai selatan Kabupaten Lumajang, pantai Buton di Kabupaten Cilacap maupun di Siliran, Yogyakarta.

Menurut Suryadi (2001) dalam Prasetio (2011), pasir besi adalah pasir yang banyak mengandung besi. Pasir besi mempunyai komposisi oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), silika dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) dan magnesium ( $\text{MgO}$ ). Hasil penelitian nilai kuat tekan silinder beton dengan tambahan 5% serbuk pasir besi menunjukkan hasil yang maksimum yaitu mengalami kenaikan kuat tekan sebesar 3,64% dibandingkan dengan beton mutu normal tanpa tambahan serbuk pasir besi. Modulus elastisitas beton dengan 5% serbuk pasir besi mengalami peningkatan sebesar 8,68% dibandingkan dengan beton normal tanpa tambahan serbuk pasir besi.

Ketersediaan pasir besi di Indonesia tergolong cukup banyak dimana pasir besi tersebut dapat dimanfaatkan dalam campuran pembuatan beton. Menurut Qomariah (2006) dalam Prasetio (2011), dalam campuran beton, pasir besi memiliki peranan dalam memperbaiki *interface* antara mortar dan agregat kasar. Kandungan unsur magnesium yang cukup kecil dapat mengurangi timbulnya pemekaran (*efflorence*) dalam struktur beton terutama bila senyawa tersebut diikat oleh air. Gejala *efflorence* ini muncul seiring dengan masa-masa pertumbuhan kekuatan beton, dimana kuat tekan beton cenderung menurun seiring dengan berkembangnya umur beton.

### 3.3 Perancangan Campuran Beton

Pada penelitian ini akan menggunakan metode perencanaan campuran adukan beton yang mengacu pada standar SNI-03-2834-2000. Tata cara urutan perencanaan campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Menentukan kuat tekan beton dan menghitung nilai deviasi standar. Apabila jumlah data hasil uji kurang dari 30 buah maka dilakukan koreksi terhadap nilai deviasi standar dengan suatu faktor pengali sedangkan bila jumlah data hasil uji

kurang dari 15, maka nilai tambah (M) diambil tidak kurang dari 12 MPa. Faktor pengali untuk deviasi standar bila data hasil uji tersedia kurang dari 30 dapat dilihat pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

**Tabel 3.1 Faktor Pengali untuk Deviasi Standar bila Data Hasil Uji yang Tersedia kurang dari 30**

| Jumlah Pengujian | Faktor Pengali |
|------------------|----------------|
| < 15             | -              |
| 15               | 1,16           |
| 20               | 1,08           |
| 25               | 1,03           |
| ≥ 30             | 1,00           |

Sumber : SNI 03-2834-2000

- Menghitung nilai tambah dengan Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$M = 1,64 \times S_r \quad (3.1)$$

dengan:

M = Nilai tambah

1,64 = Tetapan statistik yang nilainya tergantung pada persentase kegagalan hasil uji sebesar maksimum 5%

$S_r$  = Deviasi standar rencana

- Kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.2.

$$f_{cr} = f'c + M \quad (3.2)$$

dengan:

$f_{cr}$  = Kuat tekan rata-rata yang direncanakan (MPa)

$f'c$  = Kuat tekan yang disyaratkan (MPa)

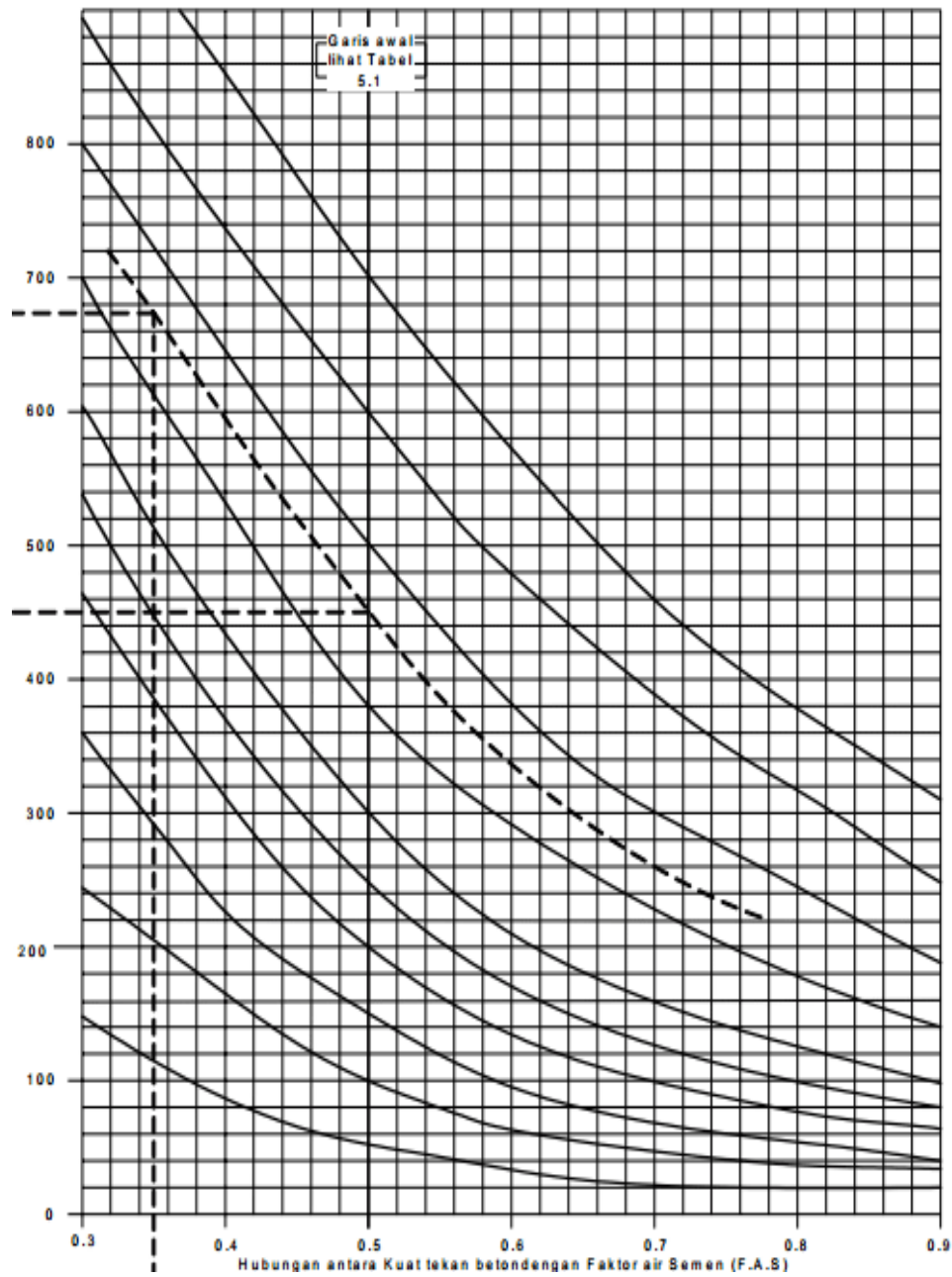
M = Nilai tambah (MPa)

4. Menentukan jenis semen yang digunakan.
5. Menentukan jenis agregat yang digunakan.
6. Menentukan faktor air semen (FAS) dengan menggunakan Tabel 3.2 dan grafik pada Gambar 3.1 atau menggunakan grafik pada Gambar 3.2, dari kedua nilai diambil FAS yang terkecil.

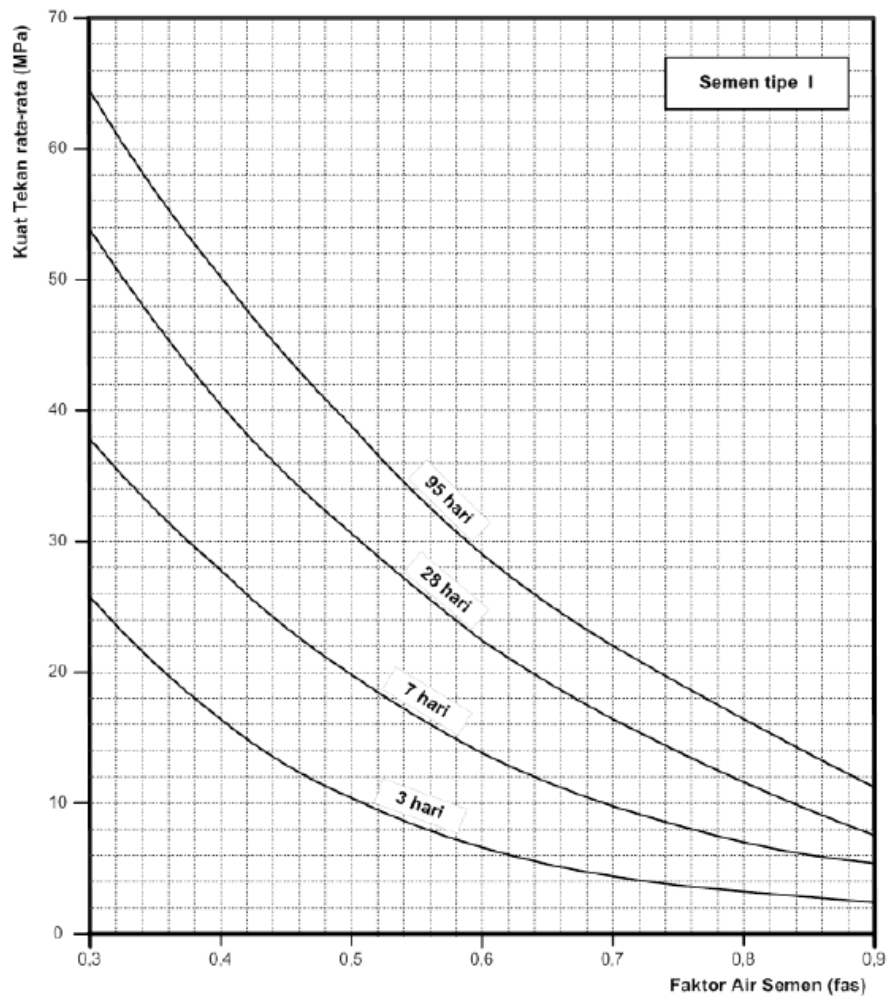
**Tabel 3.2 Perkiraan Kuat Tekan Beton (MPa) dengan fas=0,5**

| Jenis Semen                       | Jenis Agregat Kasar | Kuat Tekan (MPa) |    |    |    | Benda Uji |
|-----------------------------------|---------------------|------------------|----|----|----|-----------|
|                                   |                     | Pada Umur (hari) |    |    |    |           |
|                                   |                     | 3                | 7  | 28 | 91 |           |
| Semen <i>Portland</i><br>Tipe I   | Batu tak dipecahkan | 17               | 23 | 33 | 40 | Silinder  |
|                                   | Batu pecah          | 19               | 27 | 37 | 45 |           |
| Semen tahan sulfat<br>Tipe II, V  | Batu tak dipecahkan | 20               | 28 | 40 | 48 | Kubus     |
|                                   | Batu pecah          | 23               | 32 | 45 | 54 |           |
| Semen <i>Portland</i><br>Tipe III | Batu tak dipecahkan | 21               | 28 | 38 | 44 | Silinder  |
|                                   | Batu pecah          | 25               | 33 | 44 | 48 |           |
|                                   | Batu tak dipecahkan | 25               | 31 | 46 | 53 | Kubus     |
|                                   | Batu pecah          | 30               | 40 | 53 | 60 |           |

Sumber: SNI-03-2834-2000



**Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kuat Desak dan Faktor Air Semen  
Untuk Benda Uji Silinder**  
(Sumber: SNI-03-2834-2000)



**Gambar 3.2 Grafik Hubungan Antara Kuat Desak dan Faktor Air Semen Untuk Benda Uji Silinder**  
(Sumber: SNI-03-2834-2000)

7. Menentukan nilai *slump* sesuai dengan kondisi pelaksanaan pekerjaan agar diperoleh beton yang mudah dituangkan, dipadatkan dan diratakan.
8. Menentukan ukuran agregat maksimum dengan ketentuan tidak boleh melebihi seperlima jarak terkecil antara bidang-bidang samping dari cetakan, sepertiga dari tebal pelat dan tiga perempat dari jarak bersih minimum di antara batang-batang atau bekas-bekas tulangan.



9. Menentukan kadar air bebas agregat campuran (tak dipecah dan dipecah) dengan Persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$\text{Kadar air bebas} = \frac{2}{3} W_h + \frac{2}{3} W_k \quad (3.3)$$

dengan:

$W_h$  = Perkiraan jumlah agregat halus

$W_k$  = Perkiraan jumlah agregat kasar

Nilai  $W_h$  dan  $W_k$  diperoleh dari Tabel 3.3 sebagai berikut.

**Tabel 3.3 Perkiraan Kadar Air Bebas Tiap Meter Kubik Beton**

| Ukuran Maksimum Agregat (mm) | Jenis Agregat    | Slump (mm) |       |       |        |
|------------------------------|------------------|------------|-------|-------|--------|
|                              |                  | 0-10       | 10-30 | 30-60 | 60-100 |
| 10                           | Batu tak dipecah | 150        | 180   | 205   | 225    |
|                              | Batu pecah       | 180        | 205   | 230   | 250    |
| 20                           | Batu tak dipecah | 135        | 160   | 180   | 195    |
|                              | Batu pecah       | 170        | 190   | 210   | 225    |
| 40                           | Batu tak dipecah | 115        | 140   | 160   | 175    |
|                              | Batu pecah       | 155        | 175   | 190   | 205    |

Sumber: SNI-03-2834-2000

10. Menghitung jumlah semen yang dipakai per  $m^3$  beton dengan Persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$\text{Jumlah semen per } m^3 \text{ beton} = \frac{\text{Kadar air bebas}}{FAS} \quad (3.4)$$

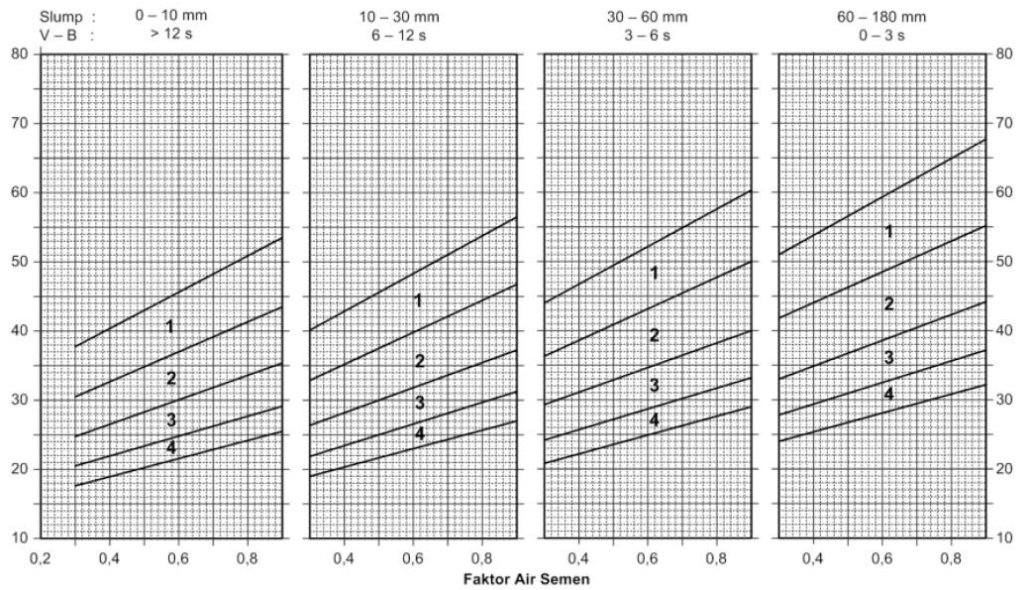
11. Menentukan jumlah semen maksimum, jika tidak ditetapkan dapat diabaikan.
12. Menentukan jumlah semen minimum dengan menggunakan Tabel 3.4 sebagai berikut.

**Tabel 3.4 Persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum untuk berbagai macam pembetonan dan lingkungan khusus**

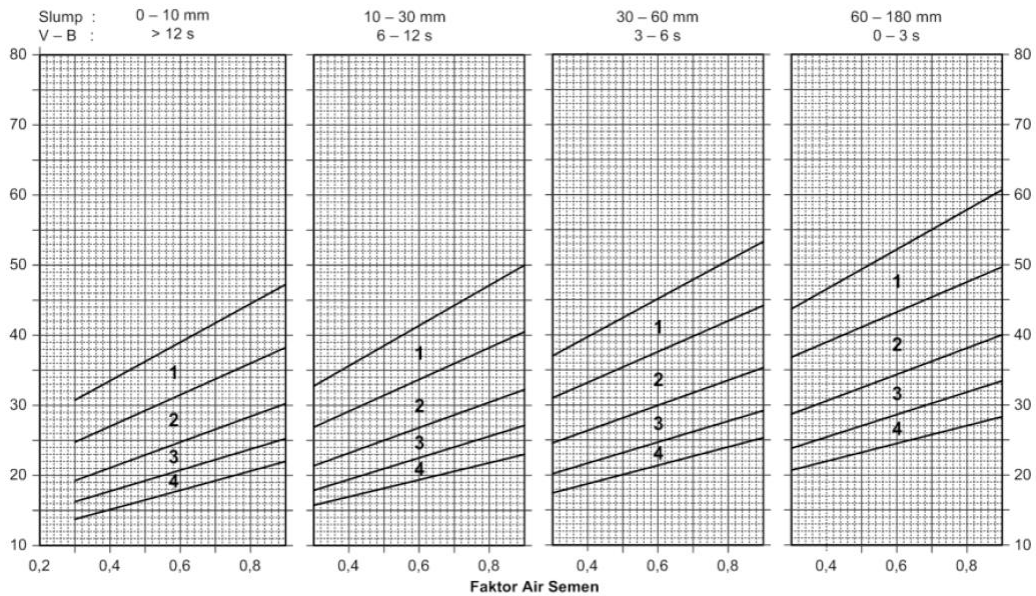
| Jenis Pembetonan  | Jumlah Semen minimum per-m <sup>3</sup> beton (kg) | Nilai fas maksimum |
|---|--|--------------------|
| Beton didalam ruangan bangunan  |  |                    |
| a. Keadaan keliling non-korosif   | 275  | 0,60               |
| b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif | 325  | 0,52               |
| Beton diluar ruangan bangunan   |  |                    |
| a. Tidak terlindungi dari hujan dan terik matahari langsung             | 325  | 0,60               |
| b. Terlindungi dari hujan dan terik matahari langsung                   | 275  | 0,60               |
| Beton masuk ke dalam tanah  |  |                    |
| a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti                    | 325  | 0,55               |
| b. Mendapatkan pengaruh sulfat dan alkali dari tanah                    |  | Tabel 5            |
| Beton yang kontinu berhubungan dengan air tawar dan air laut            |  | Tabel 6            |

Sumber: SNI-03-2834-2000

13. Menentukan persentase agregat halus dan agregat kasar dengan menggunakan grafik pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 pada halaman berikut.



**Gambar 3.3 Grafik Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang Dianjurkan Untuk Ukuran Maksimum 20 mm**  
(Sumber: SNI-03-2834-2000)



**Gambar 3.4 Grafik Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang Dianjurkan Untuk Ukuran Maksimum 40 mm**  
(Sumber: SNI-03-2834-2000)

Cara untuk menentukan persentase agregat halus dan agregat kasar dengan menggunakan grafik tersebut adalah sebagai berikut.

- a. Tentukan grafik yang akan dipakai pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 diatas berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai slump yang direncanakan.
- b. Dari grafik tersebut tarik garis vertikal ke atas berdasarkan nilai fasnya sampai ke kurva yang paling atas diantara dua kurva yang menunjukkan daerah gradasi pasir.
- c. Kemudian tarik garis horizontal pada kurva batas atas dan batas bawah ke arah kanan yang berada di daerah gradasi lalu catat nilainya.
- d. Hitunglah nilai persentase agregat halus dari nilai rata-rata dua nilai tersebut.
- e. Untuk nilai persentase agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$\text{Nilai persentase agregat kasar} = 100\% - \text{Persentase agregat halus} \quad (3.5)$$

14. Menghitung berat jenis agregat dengan menggunakan Persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$BJ_{AG} = (\% AH \times BJ_{AH}) + (\% AK \times BJ_{AK}) \quad (3.6)$$

dengan:

$BJ_{AG}$  = Berat jenis agregat gabungan

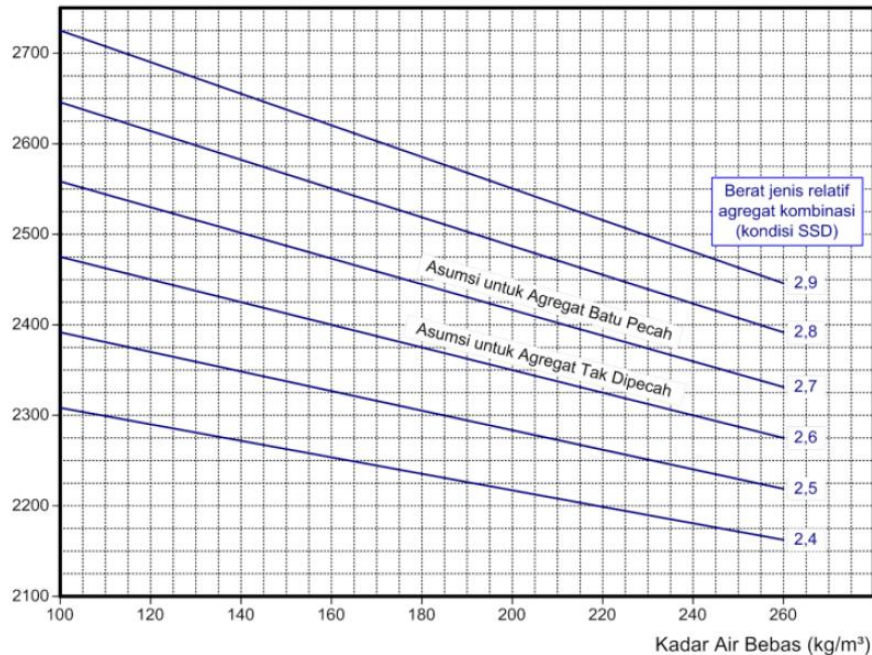
$BJ_{AH}$  = Berat jenis agregat halus

$BJ_{AK}$  = Berat jenis agregat kasar

$\%AH$  = Persentase agregat halus

$\%AK$  = Persentase agregat kasar

15. Menghitung nilai berat isi beton dengan menggunakan grafik pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



**Gambar 3.5 Grafik Perkiraan Berat Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan**

(Sumber: SNI-03-2834-2000)

Langkah-langkah untuk menghitung nilai berat isi beton dengan menggunakan grafik pada Gambar 3.5 adalah sebagai berikut.

- a. Pada Gambar 3.5, buatlah kurva sesuai dengan nilai berat jenis agregat gabungan yang telah dihitung sejajar dengan garis linier yang telah ada pada grafik,
  - b. Tarik garis vertikal ke atas sesuai dengan nilai kadar air bebas yang digunakan hingga memotong kurva yang telah dibuat
  - c. Kemudian dari titik potong tersebut tarik garis horizontal ke arah kiri sampai memotong sumbu tegak dan didapat nilai berat isi beton
16. Menghitung kadar agregat gabungan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$\text{Kadar agregat gabungan} = \text{Berat isi beton} - \text{kadar semen} - \text{kadar air bebas} \quad (3.7)$$

17. Menghitung kadar agregat halus dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$\text{Kadar agregat halus} = \frac{\% \text{ Agregat halus}}{100} \times \text{kadar agregat gabungan} \quad (3.8)$$

18. Menghitung kadar agregat kasar dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.9 sebagai berikut.

$$\text{Kadar agregat kasar} = \frac{\% \text{ Agregat kasar}}{100} \times \text{kadar agregat gabungan} \quad (3.9)$$

19. Menghitung kadar pasir besi dari berat agregat halus.

### 3.4 *Slump* Beton

*Slump* beton adalah penurunan ketinggian pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji *slump* diangkat (SNI 03-1972-2008). Untuk melakukan pengujian *slump* dilakukan pada kondisi beton masih segar, hal ini berkaitan dengan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*). Nilai *slump* yang rendah menunjukkan bahwa campuran beton dalam keadaan kental sedangkan nilai *slump* yang tinggi menunjukkan campuran beton dalam keadaan encer. Pada penelitian ini pengujian *slump* yang dilakukan mengacu pada SNI 03-1972-2008.

### 3.5 Penyerapan Air Beton

Penyerapan air beton adalah persentase berat air yang mampu diserap oleh pori beton silinder. Dalam memperoleh nilai kadar penyerapan air menggunakan Persamaan 3.10.

$$\text{Kadar Air} = \frac{M_b - M_k}{M_k} \times 100\% \quad (3.10)$$

dengan:

Mb = Massa basah beton silinder setelah direndam

Mk = Massa kering beton silinder setelah direndam

### 3.6 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin uji. Kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton dibandingkan dengan sifat-sifat beton yang lainnya. Kekuatan tekan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar, agregat halus dan air. Penggunaan air digunakan untuk memberikan aksi kimiawi dalam pengerasan beton, kelebihan air dapat mempermudah dalam pekerjaan akan tetapi dapat menurunkan kekuatan beton (Wang dan Salmon, 1990). Berdasarkan SNI 03-1974-2011 nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

dengan:

$f'c$  = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm<sup>2</sup>)

### 3.7 Kuat Tarik Belah Beton

Selain memiliki kelebihan dengan kuat tekannya yang tinggi, beton juga memiliki kelemahan. Salah satu kelemahan beton adalah mempunyai kuat tarik yang sangat rendah. Menurut Ferguson (1986) dalam Rahamudin dkk. (2016), kuat tarik beton berpengaruh terhadap kemampuan beton dalam mengatasi retak awal sebelum dibebani. Nilai kuat tarik beton relatif rendah, sekitar 10-15% dari kuat tekan beton. Kekuatan ini lebih sulit diukur dan hasilnya berbeda dari satu bahan percobaan ke

bahan percobaan yang lain dibandingkan untuk silinder-silinder tekan. Berdasarkan SNI 03-2491-2002 nilai kuat tarik beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.12 sebagai berikut.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.12)$$

dengan:

$f_{ct}$  = Kuat tarik belah beton (MPa)

$P$  = Beban maksimum (N)

$D$  = Diameter benda uji (mm)

$L$  = Panjang benda uji (mm)

### 3.8 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas menunjukkan kekakuan suatu bahan dalam menerima beban. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas suatu bahan maka lendutan yang terjadi semakin kecil, artinya bahan akan menerima beban yang besar dengan regangan yang kecil sehingga semakin tinggi nilai kuat tekannya maka nilai modulus elastisitasnya semakin tinggi.

Kemiringan suatu garis lurus yang menghubungkan titik pusat dengan suatu harga regangan (sekitar 40%  $f'_c$ ) disebut modulus elastisitas beton. Pada umumnya kurva regangan dan tegangan yang terjadi pada beton saat nilai 40% dari  $f'_c$  dianggap dalam kondisi yang linier dan sesudah mendekati 70% tegangan hancur, pada saat kondisi hancur material banyak kehilangan kekakuannya sehingga menjadikan kurva tidak linier (Sidik, 2010). Modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus ASTM C-469 sebagai berikut.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (3.13)$$



dengan:

$E_c$  = Modulus elastisitas beton (MPa)

$S_2$  = Kuat tekan pada saat 40% dari beban maksimum, dalam MPa

$S_1$  = Kuat tekan pada saat regangan longitudinal mencapai  $\varepsilon_1 = 0,000005$

$\varepsilon_2$  = Regangan longitudinal yang dihasilkan pada saat  $S_2$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.14)$$

dengan:

$\Delta_L$  = Deformasi longitudinal (mm)

$L_0$  = Tinggi efektif pengukuran (mm)