

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 MATERIAL PENYUSUN BETON

3.1.1 Semen Portland (*Portland Cement*)

Semen adalah suatu bahan yang memiliki sifat adhesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat. Dalam pengertian umum, semen adalah suatu binder, suatu zat yang dapat menetapkan dan mengeraskan dengan bebas, dan dapat mengikat material lain. Walaupun komposisi semen dalam beton hanya sekitar 10%, namun karena fungsinya sebagai bahan pengikat maka peranan semen menjadi penting (Mulyono, 2004). Bahan dasar pembentuk semen dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Bahan Dasar Pembentuk Semen

Penulisan Unsur Kimia	Pembacaan	Singkatan	Kadar (%)
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	<i>Tricalcium silicat</i>	C3S	58-69
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	<i>Dicalcium silikat</i>	C2S	8-15
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	<i>Tricalcium aluminate</i>	C3A	2-15
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	<i>Tetracalcium alummoferrit</i>	CaAF	6-14

Sumber: Mulyono (2004)

Jenis semen yang digunakan dalam pembuatan beton ini adalah semen Portland. Semen Portland atau *Portland Cement (PC)* menurut SNI 15-2049-2004 adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Semen Portland (sering disebut sebagai *OPC*, singkatan dari *Ordinary Portland Cement*) adalah jenis yang paling umum dari semen yang digunakan secara umum di seluruh dunia karena merupakan bahan dasar beton, mortar, plester.

Semen Portland adalah material yang mengandung paling tidak 75% kalsium silikat ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ dan $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), sisanya tidak kurang dari 5% berupa Al silikat, Al ferit silikat, dan MgO. Rasio CaO untuk SiO₂ tidak boleh kurang dari 2,0.

Pengertian semen portland menurut SNI 15-2049-2004 adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Pembagian kategori semen portland berdasarkan jenis dan penggunaannya menurut SNI 15-2049-2004 dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Pembagian Kategori Semen Portland Berdasarkan Jenis dan Penggunaannya

Kategori	Penggunaan
Jenis I	Penggunaan umum, tidak memerlukan persyaratan khusus
Jenis II	Memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang
Jenis III	Memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi
Jenis IV	Memerlukan kalor hidrasi rendah
Jenis V	Memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat

Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2004)

Berdasarkan persentase kandungan penyusunnya, semen Portland terdiri dari 5 tipe yaitu.

1. Semen Portland tipe I adalah perekat hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling klinker yang kandungan utamanya kalsium silikat dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat. Komposisi senyawa yang terdapat pada tipe ini adalah: 55% (C₃S); 19% (C₂S); 10% (C₃A); 7% (C₄AF); 2,8% MgO; 2,9% (SO₃); 1,0% hilang dalam pembakaran, dan 1,0% bebas CaO.

2. Semen Portland tipe II dipakai untuk keperluan konstruksi umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus terhadap panas hidrasi dan kekuatan tekan awal, dan dapat digunakan untuk bangunan rumah pemukiman, gedung-gedung bertingkat dan lain-lain. Komposisi senyawa yang terdapat pada tipe ini adalah: 51% (C3S); 24% (C2S); 6% (C3A); 11% (C4AF); 2,9% MgO; 2,5% (SO₃); 0,8% hilang dalam pembakaran, dan 1,0% bebas CaO.
3. Semen Portland tipe III dipakai untuk konstruksi bangunan dari beton massa (tebal) yang memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang, misal bangunan dipinggir laut, bangunan bekas tanah rawa, saluran irigasi, dam-dam. Komposisi senyawa yang terdapat pada tipe ini adalah: 57% (C3S); 19% (C2S); 10% (C3A); 7% (C4AF); 3,0% MgO; 3,1% (SO₃); 0,9% hilang dalam pembakaran, dan 1,3% bebas CaO.
4. Semen Portland tipe IV dipakai untuk konstruksi bangunan yang memerlukan kekuatan tekan tinggi pada fase permulaan setelah pengikatan terjadi, misal untuk pembuatan jalan beton, bangunan-bangunan bertingkat, bangunan-bangunan dalam air. Komposisi senyawa yang terdapat pada tipe ini adalah: 28% (C3S); 49% (C2S); 4% (C3A); 12% (C4AF); 1,8% MgO; 1,9% (SO₃); 0,9% hilang dalam pembakaran, dan 0,8% bebas CaO.
5. Semen Portland tipe V dipakai untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan dan pembangkit tenaga nuklir. Komposisi senyawa yang terdapat pada tipe ini adalah: 38% (C3S); 43% (C2S); 4% (C3A); 9% (C4AF); 1,9% MgO; 1,8% (SO₃); 0,9% hilang dalam pembakaran, dan 0,8% bebas CaO.

3.1.2 Agregat

Agregat adalah bahan yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat juga dapat berupa bahan yang berasal dari alam seperti batuan, pasir dan sebagainya, ataupun berupa bahan sintesis atau buatan. Nawy (1985) menyatakan agregat merupakan komponen beton yang paling berperan dalam menentukan besarnya. Pada komposisi beton biasanya terdapat sekitar 60% sampai 80% volume agregat. Agregat ini harus bergradasi sedemikian rupa

sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh atau monolit, homogen, dan rapat, dimana agregat yang berukuran kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada di antara agregat yang berukuran besar.

Menurut SNI 2847-2013 (Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung) agregat untuk beton harus memenuhi syarat berikut.

1. Agregat Normal : ASTM C33M
2. Agregat Ringan : ASTM C330M

Pengecualian: Agregat yang telah terbukti melalui pengujian atau penggunaan nyata dapat menghasilkan beton dengan kekuatan dan keawetan yang baik dan disetujui oleh instansi tata bangunan.

Secara umum agregat yang digunakan untuk membuat campuran beton dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat halus dan agregat kasar.

1. Agregat Halus

Nawy (1985) mendefinisikan agregat halus sebagai bahan pengisi yang berupa pasir. Ukurannya bervariasi antara ukuran no. 4 dan no. 100 saringan standar Amerika. Agregat halus yang digunakan harus memenuhi persyaratan karena sangat berpengaruh pada kualitas beton yang dihasilkan. Menurut PBI 1971, syarat-syarat agregat halus (pasir) adalah sebagai berikut.

- a. Agregat halus terdiri dari butiran-butiran tajam dan keras, bersifat kekal dalam arti tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti panas matahari dan hujan.
- b. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% terhadap jumlah berat agregat kering. Apabila kandungan lumpur lebih dari 5%, agregat halus harus dicuci terlebih dahulu.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan – bahan organik terlalu banyak. Hal demikian dapat dibuktikan dengan percobaan warna dari *Abrams Header* dengan menggunakan larutan NaOH.
- d. Agregat halus terdiri dari butiran-butiran yang beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan dalam pasal 3.5 ayat 1 (PBI 1971), harus memenuhi syarat sebagai berikut.

- 1) Sisa di atas ayakan 4 mm , harus minimum 2% berat.
- 2) Sisa di atas ayakan 1 mm , harus minimum 10% berat.
- 3) Sisa di atas ayakan 0,25 mm , harus berkisar antara 80% - 90% berat

2. Agregat kasar

Nawy (1985) mendefinisikan agregat kasar apabila ukurannya sudah melebihi $\frac{1}{4}$ in. (6 mm). Sifat agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca, dan efek-efek perusak lainnya. Menurut PBI 1971, pasal 3.4 syarat-syarat agregat kasar (kerikil) adalah sebagai berikut.

- a. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- b. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% yang ditentukan terhadap berat kering. Apabila kadar lumpur melampaui 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- c. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti zat-zat yang reaktif alkali.
- d. Kekerasan butir-butir agregat kasar yang diperiksa dengan bejana pengujian dari Rudelof dengan beton pengujian 20 ton, yang harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut.
 - 1) Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5-19 mm lebih dari 24% berat.
 - 2) Tidak terjadi pembubukan sampai 19-30 mm lebih dari 22% berat.

Kekerasan ini dapat juga diperiksa dengan mesin *Los Angeles*. Dalam hal ini tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%.

- e. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan dalam pasal 3.5 ayat 1 PBI 1971, harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut.
 - 1) Sisa diatas ayakan 31,5 mm harus 0% berat.

- 2) Sisa diatas ayakan 4 mm harus berkisar antara 90% dan 98% berat.
- 3) Selisih antara sisa-sisa kumulatif diatas dua ayakan yang berurutan , maksimum 60% dan minimum 10% berat.

Sedangkan menurut SNI 2847-2013 (Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung) Ukuran Maksimum Agregat kasar harus tidak melebihi:

- 1) 1/5 jarak terkecil antara sisi cetakan, ataupun
- 2) 1/3 ketebalan slab, ataupun
- 3) 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan atau kawat, bundel tulangan, atau tendon prategang, atau selongsong.

Batasan ini tidak berlaku bila dalam pertimbangan insinyur profesional bersertifikat, kelecakan (*workability*) dan metoda pemadatan adalah agar beton dapat dicor tanpa keropos atau rongga udara.

3.1.3 Air

Tjokrodimuljo (1992) menyatakan bahwa air diperlukan untuk bereaksi dengan semen sehingga terjadi reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya proses pengerasan pada beton, serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan. Menurut SNI 2847-2013 (Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung) disyaratkan air yang akan dipakai harus memenuhi ASTM C1602M atau SNI 03-7974-2013 (Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis). Selain itu menurut Tjokrodimuljo (1992) dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya memenuhi syarat sebagai berikut.

1. Kandungan lumpur (benda melayang lainnya) maksimum 2 gram/liter.
2. Kandungan garam-garam yang merusak beton (asam, zat organik, dll) maksimum 15 gram/liter.
3. Kandungan klorida (Cl) maksimum 0,5 gram/liter.
4. Kandungan senyawa sulfat maksimum 1 gram/liter.

Kekuatan beton dan daya tahannya akan berkurang jika air mengandung kotoran. Pengaruh pada beton diantaranya pada lamanya waktu ikatan awal serta kekuatan beton setelah mengeras. Adanya lumpur dalam air diatas 2 gram/liter dapat mengurangi kekuatan beton. Air dapat memperlambat ikatan awal beton

sehingga beton belum mempunyai kekuatan dalam umur 2-3 hari. Sodium karbonat dan potasium dapat menyebabkan ikatan awal sangat cepat dan konsentrasi yang besar akan mengurangi kekuatan beton. Air yang dibutuhkan agar terjadi proses hidrasi kira-kira 25% dari berat semen (Tjokrodimuljo, 1992).

3.1.4 Serat Karbon

Xiaosong Huang (2009), Pasar serat karbon saat ini didominasi oleh serat karbon *Polyacrylonitrile* (PAN), sedangkan sisanya adalah serat karbon *Pitch*. Prekursor yang berbeda menghasilkan serat karbon dengan sifat yang sedikit berbeda. Meskipun memproduksi serat karbon dari prekursor yang berbeda dan membutuhkan kondisi pemrosesan yang berbeda, namun fitur-fitur dasarnya sangat mirip. Umumnya, serat karbon diproduksi dengan proses pirolisis terkontrol dari serat prekursor yang telah distabilkan. Serat prekursor pertama kali distabilkan pada kisaran suhu 200-400° C di udara melalui proses oksidasi. Serat yang sudah dapat di infusi dan telah stabil kemudian dipanaskan kembali pada suhu yang lebih tinggi, yaitu sekitar 1.000° C dalam atmosfer lembam untuk menghilangkan hidrogen, oksigen, nitrogen, dan elemen non-karbon lainnya langkah ini sering disebut karbonisasi. Serat yang sudah dikarbonisasi kemudian berlanjut ke proses grafitisasi pada suhu yang lebih tinggi hingga sekitar 3.000 ° C untuk mencapai kandungan karbon yang lebih tinggi dan modulus Young yang lebih tinggi searah memanjang serat. Sifat-sifat serat karbon / grafit yang dihasilkan dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kristalinitas, distribusi kristalin, orientasi molekul, kandungan karbon, dan jumlah cacat. Sebelum pengemasan, permukaan yang relatif lembam dari serat karbon / grafit diberikan perlakuan khusus untuk meningkatkan daya rekatnya pada material komposit.

Dalam hal sifat mekaniknya, serat karbon dapat secara umum diklasifikasikan sebagai berikut, yaitu modulus elastisitas sangat tinggi (> 500 GPa), modulus elastisitas tinggi (> 300 GPa), modulus elastisitas menengah (> 200 GPa), modulus elastisitas rendah (100 GPa), dengan kuat tarik serat yang tingginya seragam (> 4 GPa). Serat karbon juga dapat diklasifikasikan berdasarkan suhu perlakuan akhir, yaitu tipe I (perlakuan panas 2.000 ° C), tipe II (perlakuan panas 1.500 ° C), dan tipe III (perlakuan panas 1.000 ° C). Serat karbon PAN II tipe

biasanya serat karbon kekuatan tinggi, sementara sebagian besar serat karbon modulus tinggi termasuk tipe I.

Agus Edy Pramono (2012), komposit yang dibuat dari serat karbon lima kali lebih kuat daripada baja untuk komponen struktur, juga masih lima kali lebih ringan. Sebagai perbandingan terhadap aluminium, komposit serat karbon tujuh kali lebih kuat dan dua kali lebih kaku, juga 1,5 kali lebih ringan. Komposit serat karbon mempunyai sifat leleh yang super terhadap semua metal yang dikenal, dan ketika berpasangan dengan resin yang tepat, komposit serat karbon adalah salah satu bahan yang ada yang paling tahan korosi. Prosed pembuatan serat karbon pada umumnya ada 2 metode yang dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3.3 Serat karbon berbasis (PAN) Polyacrylonitrile

Sifat	Komersial, modulus standar	Aerospace		
		Modulus standar	Modulus menengah	Modulus tinggi
Modulus tarik, GPa	228	220 – 241	290 – 297	345 – 448
Kekuatan tarik, MPa	3800	3450 – 4830	3450 – 6200	3450 – 5520
Perpanjangan pada patahan, %	1,6	1,5 – 2,2	1,3 – 2,0	0,7 – 1,0
Ketahanan Elektrik, $\mu\Omega.cm$	1650	1650	1450	900
Koduktivitas panas , W/m.K	20	20	20	50-80
Koefisien ekspansi panas, arah aksial, 10^{-6} K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Densitas, g/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9
Kandungan karbon, %	95	95	95	+99
Diameter Filamen, μm	6 – 8	6 – 8	5 – 6	5 – 8

Sumber : Agus Edy Pramono (2012)

Tabel 3.4 Serat karbon berbasis PITCH

Sifat	Modulus rendah	Modulus tinggi	Modulus sangat tinggi
Modulus tarik, GPa	170 – 241	380 – 620	690 – 965
Kekuatan tarik, MPa	1380 – 3100	1900 – 2750	2410
Perpanjangan pada patahan, %	0,9	0,5	0,4 – 0,27
Ketahanan Elektrik, $\mu\Omega.cm$	1300	900	220 – 130
Koduktivitas panas, W/m.K	-	-	400 – 1100
Koefisien ekspansi panas, arah aksial, $10^{-6} K$	-	-0,9	-1,6
Densitas, g/cm^3	1,9	2,0	2,2
Kandungan karbon, %	+97	+99	+99
Diameter Filamen, μm	11	11	10

Sumber : Agus Edy Pramono (2012)

Sedangkan menurut *Tevhcnical Data Sheet* serat karbon yang akan digunakan memiliki kuat tarik sebesar 3800 MPa ($387,49 \text{ kg/mm}^2$) dan dengan modulus elastisitas sebesar 240 Gpa (24473 kg/mm^2), serat karbon ini juga dapat memanjang sebesar 1,6% dengan massa jenis $1,8 \text{ Ton/M}^3$ (Maliq Carbon Indonesia Composite Material).

3.1.5 SIKA VISCOCRETE-3115 N

Product Data Sheet Sika Viscocrete-3115 N (2016), Sika Viscocrete-3115 N adalah *super-plasticizer* generasi ke-3 untuk mortar dan beton. Dikembangkan untuk produksi beton yang mudah mengalir dengan mengurangi retensi kemampuan mengalirnya (*High flow concrete / Self-Compacting concrete (SCC)*) dan secara signifikan mengurangi *bleeding* dan segregasi.

Menurut *Product Data Sheet* Sika Viscocrete-3115 N (2016), Sika Viscocrete-3115N berfungsi untuk mengurangi kebutuhan air secara signifikan (*Extreme water reduction*) hingga 30% dalam campuran beton ataupun mortar, meningkatkan daya alir yang tinggi dengan kohesi yang optimal (*Exclent flowability with optimal cohesion*), meningkatkan kemampuan beton untuk melakukan pemadatan sendiri (*Strong self-compacting behaviour*), meningkatkan

kekuatan beton dan sangat baik diaplikasikan untuk beton pada cuaca yang panas dengan jarak transportasi atau pengiriman beton yang jauh serta meningkatkan *wrokability* yang tinggi.

Menurut *Product Data Sheet* Sika Viscocrete-3115 N (2016), Sika Viscocrete-3115 N merupakan polimer berbahan dasar *Aqueous solution of modified polycarboxylate copolymers*. Produk ini memiliki massa jenis hampir sama seperti air, yaitu $1,065 \pm 0,01$ Kg/L dimana air bermassa jenis 1Kg/L. Dosis Sika Viscocrete-3115 N yang disarankan adalah sebesar 0,2-0,6% untuk *Soft Plastic Concrete* dan 0,6-2,0% untuk beton yang mudah mengalir dan memadat sendiri atau *Flowing and Self-Compacting Concrete (SCC)*, persentase berdasarkan bahan pengikat beton (*binder*) dan dalam hal ini adalah semen.

3.2 KUAT TEKAN BETON

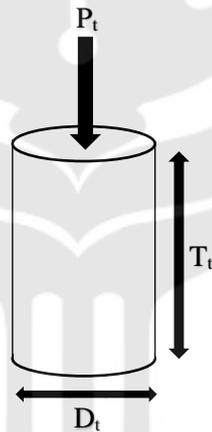
Kuat tekan beton merupakan perbandingan besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Menurut (Wang, Chu Kia. dkk (1990), Kekuatan desak beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air dan berbagai jenis campuran. Perbandingan dari air semen merupakan factor utama dalam menentukan kekuatan beton. Semakin rendah perbandingan air semen, semakin tinggi kekuatan desaknya. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberikan aksi kimiawi dalam pengerasan beton, kelebihan air meningkatkan kemampuan pekerjaan (mudahnya beton untuk dicorkan) akan tetapi menurunkan kekuatan.

Kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f'_c dengan satuan N/m^2 atau MPa (Mega Pascal). Sebelum diberlakukannya system satuan SI di Indonesia, nilai tegangan menggunakan satuan kgf/cm^2 . Kuat tekan beton umur 28 hari berkisar antara nilai $\pm 10-65$ MPa. Untuk beton bertulang umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan berkisar 17-30 MPa, sedangkan untuk beton prategang digunakan beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi, berkisar antara 30-45 MPa. Untuk keadaan dan keperluan khusus, beton *ready mix* sanggup mencapai nilai kuat tekan 62 MPa dan untuk memproduksi beton kuat

tekan tinggi tersebut umumnya dilaksanakan dengan pengawasan ketat dalam laboratorium.

Nilai kuat tekan beton beragam sesuai dengan umurnya dan biasanya ditentukan waktu beton mencapai umur 28 hari setelah pengecoran. Umumnya pada umur 7 hari kuat tekan beton mencapai 70% dan pada umur 14 hari mencapai 85% sampai 90% dari kuat tekan beton umur 28 hari (Dipohusoo. I (1994)). Sketsa pembebanan kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F'_c = \frac{P_t}{\frac{1}{4} \times \pi \times D_t^2} \quad (3.1)$$



Gambar 3.1 Sketsa Pengujian Kuat Tekan Pada Silinder

keterangan: F'_c = kuat tekan beton (MPa)

P_t = beban tekan maksimum (N)

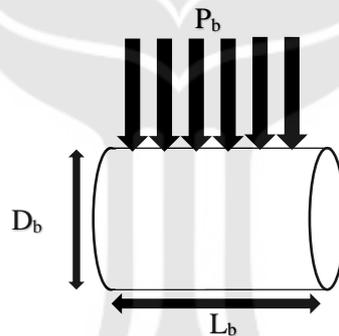
D_t = diameter permukaan benda uji (mm)

T_t = tinggi benda uji (mm)

3.3 KUAT TARIK BELAH BETON

Menurut Wang, Chu Kia, dkk (1990), kekuatan beton di dalam tarik adalah juga suatu sifat yang mempengaruhi perambatan dan ukuran dari retak di dalam struktur. Kekuatan tarik biasanya ditentukan dengan menggunakan percobaan pembebanan silinder (*the split-cylinder*) menurut ASTM C496 dimana silinder yang ukurannya sama dengan benda uji dalam percobaan tekan diletakkan pada sisinya di atas mesin uji dengan beban tekan P dikerjakan secara merata dalam arah diameter di sepanjang benda uji. Benda uji silinder akan terbelah dua pada saat dicapainya kekuatan tarik. Sketsa pembebanan tegangan tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_t = \frac{2 \times P_b}{\pi \times L_b \times D_b} \quad (3.2)$$



Gambar 3.2 Sketsa Pengujian Kuat Tarik Belah Pada Silinder

keterangan: F_t = kuat tarik belah (MPa)
 P_b = beban pada waktu belah (N)
 L_b = panjang benda uji silinder (mm)
 D_b = diameter benda uji silinder (mm)

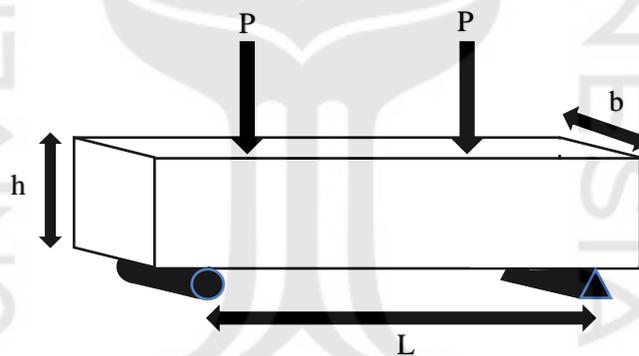
3.4 KUAT LENTUR BETON

Menurut Wang, Chu Kia. dkk (1990), kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakkan untuk menahan gaya yang arahnya tegak lurus sumbu benda uji yang diberikan padanya, sampai benda itu patah.

3.4.1 Sistem Pembebanan Dua Titik

Bila akibat pengujian patahnya benda uji berada di daerah pusat pada 1/3 jarak titik perletakkan pada bagian tarik beton, sketsa pembebanan kuat lentur beton dengan pembebanan dua titik dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{lt} = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (3.3)$$



Gambar 3.3 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Pembebanan Dua Titik Pada Balok

keterangan: F_{lt} = kuat lentur beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

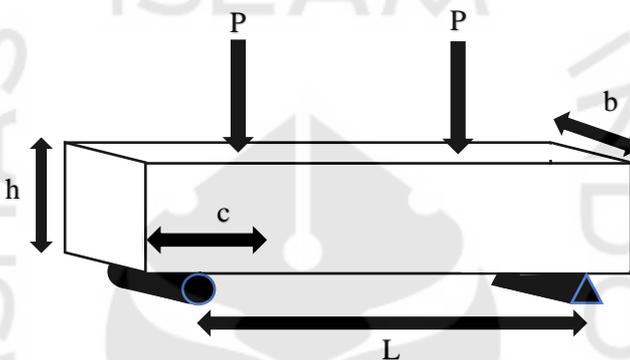
L = bentang/jarak kedua perletakkan (mm)

b = lebar penampang melintang benda uji (mm)

h = tinggi penampang melintang benda uji (mm)

Bila akibat pengujian, benda uji mengalami patah di luar area pembebanan (di luar bentang pembebanan) namun titik patah masih di dalam batas area sebesar 5% bentang yang berada di kanan kiri bentang pembebanan, sketsa pembebanan kuat lentur beton dengan pembebanan dua titik dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{lt} = \frac{3 \times P \times c}{b \times h^2} \quad (3.4)$$



Gambar 3.4 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Pembebanan Dua Titik Pada Balok Dengan Titik Patah Kurang Dari 5%

keterangan: F_{lt} = kuat lentur beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = bentang/jarak kedua perletakkan (mm)

b = lebar penampang melintang benda uji (mm)

h = tinggi penampang melintang benda uji (mm)

c = jarak rata-rata penampang melintang patah benda uji dari

tumpuan terdekat, diukur pada empat sisi bentang benda uji

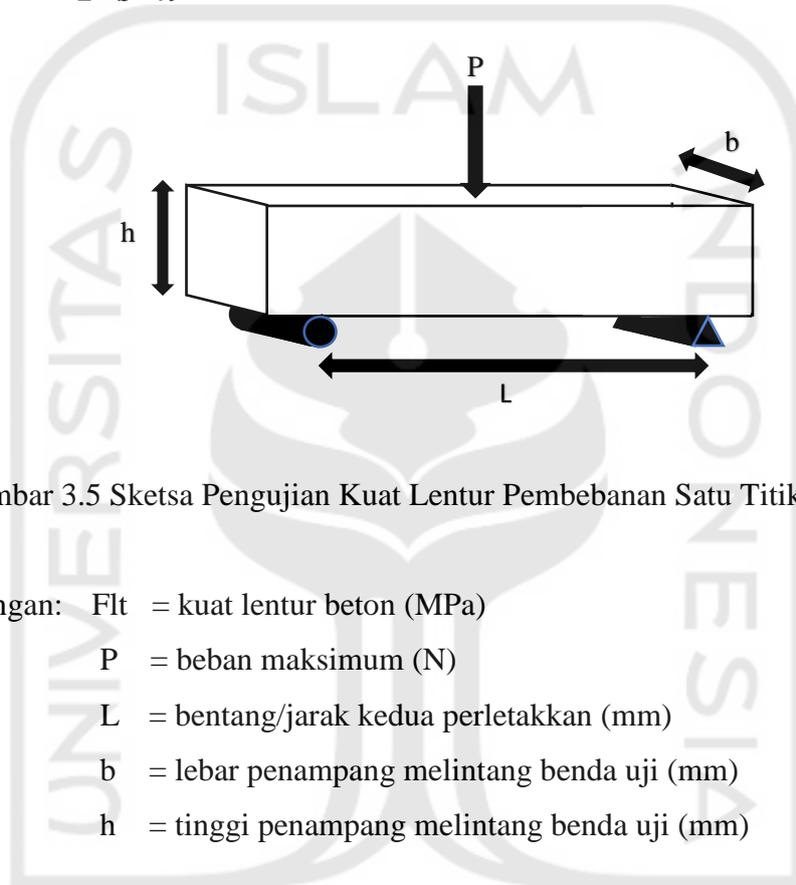
(mm)

Bila benda uji patah akibat pengujian patahnya di luar pusat pada bagian tarik beton dan jarak titik patah dan titik pembebanan lebih dari 5% bentang, maka hasil pengujian benda uji tidak dapat dipergunakan.

3.4.2 Sistem Pembebanan Satu Titik

Bila akibat pengujian patahnya benda uji tepat berada di bawah beban (di tengah benda uji), sketsa pembebanan kuat lentur beton dengan pembebanan satu titik dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{lt} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3.5)$$

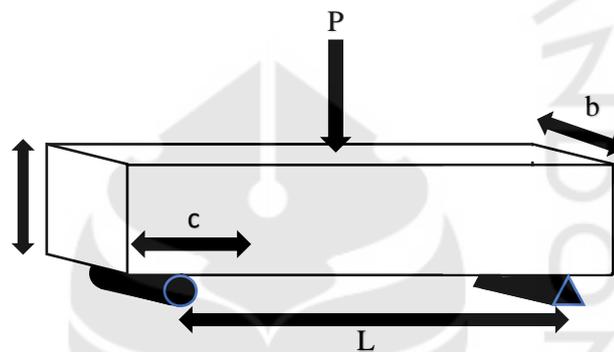


Gambar 3.5 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Pembebanan Satu Titik Pada Balok

keterangan: F_{lt} = kuat lentur beton (MPa)
 P = beban maksimum (N)
 L = bentang/jarak kedua perletakkan (mm)
 b = lebar penampang melintang benda uji (mm)
 h = tinggi penampang melintang benda uji (mm)

Bila akibat pengujian, patahnya benda uji tidak tepat di bawah beban namun dibagian tarik beton, yaitu titik patah masih berada dalam area 10% dari bentang yang berada di kakan kiri pusat beban, sketsa pembebanan kuat lentur beton dengan pembebanan satu titik dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{lt} = \frac{3 \times P \times c}{b \times h^2} \quad (3.6)$$



Gambar 3.6 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Pembebanan Satu Titik Pada Balok Dengan titik Patah Kurang Dari 10%

keterangan: F_{lt} = kuat lentur beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = bentang/jarak kedua perletakkan (mm)

b = lebar penampang melintang benda uji (mm)

h = tinggi penampang melintang benda uji (mm)

c = jarak rata-rata penampang melintang patah benda uji dari tumpuan terdekat, diukur pada empat sisi bentang benda uji (mm)

Bila benda uji patah akibat pengujian namun patahnya tidak tepat di bawah beban pada bagian tarik beton dan jarak antara titik patah dan titik beban lebih dari 10% bentang, maka hasil pengujian tidak dapat dipergunakan.

3.5 MODULUS ELASTISITAS BETON

Setiap bahan akan berubah bentuk jika mengalami pembebanan, dan regangan yang timbul dapat diukur. Bila setelah pembebanan dihilangkan bahan tersebut kembali ke bentuk asalnya, maka kejadian tersebut disebut elastik atau kenyal. Modulus elastisitas adalah kemiringan dari diagram tegangan-regangan dalam daerah elastis linier (Smith, 1980). Modulus elastisitas chord (E_c) dapat dihitung dengan rumus:

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c} \quad (3.7)$$

Keterangan: E_c = Modulus elastisitas (MPa)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

3.6 HIPOTESIS

Ditinjau dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh E. Mello, C. Ribellato dan E. Mohamedelhassan (2014) dimana mereka meneliti berbagai macam serat, seperti serat selulosa, serat besi baja, serat karbon dan serat PET. Pada pencampuran serat karbon dengan proporsi campuran sebesar 0% (beton kontrol) ; 0,2% ; 0,3% ; 0,4% dan 0,5% yang semua persentase diambil berdasarkan berat beton normal. Dengan mengamati hasil penelitian pada penambahan serat karbon dengan komposisi campuran 0,4% dari berat beton normal karena menghasilkan peningkatan kekuatan beton paling optimal, yaitu kuat tekan -2,1% ; kuat lentur 45,4% dan kuat tarik belah 11,3%. Maka dalam penelitian ini juga akan dipakai komposisi serat karbon yang sama, yaitu sebesar 0,4% dari berat beton normal, dengan variasi pembeda ada pada potongan panjang serat, yaitu 5mm, 10mm dan 15mm yang dimana pada penelitian E. Mello, C. Ribellato dan E. Mohamedelhassan (2014) tidak diperhatikan panjang serat yang akan dicampurkan.

Dengan mengambil nilai campuran optimal dari penelitian sebelumnya (0,4%), dan dengan perbedaan panjang serat yang bervariasi, memberikan pengaruh sebaran serat yang bervariasi pula dari setiap panjang serat dan mengetahui nilai optimal panjang serat yang sebaiknya dipakai dalam campuran

beton serat karbon. Sebaran serat dan panjang serat yang optimal dapat mengisi rongga-rongga dalam beton dan memperbaiki sifat dari beton yang lemah dalam menahan pembebanan tarik dan tingkat keelastisitasannya secara optimal juga.

3.7 PERHITUNGAN MIX DESIGN

Perhitungan rencana campuran beton menggunakan metode SNI-03-2834-2000. Berikut ini adalah langkah-langkah perhitungan/pembuatan rencana campuran beton (*mix design*).

1. Menentukan kuat desak/tekan beton rencana (f'_c) pada umur tertentu.
2. Mencari nilai deviasi standar yang tergantung pada volume pekerjaan beton yang akan dibuat seperti pada Tabel 3.5 dan mutu pekerjaan yang dapat diterima seperti pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel 3.5 Mutu Pelaksanaan, Volume Adukan dan Deviasi Standar

Volume Pekerjaan		Deviasi Standar sd (MPa)		
Sebutan	Volume Beton (m ³)	Mutu Pekerjaan		
		Baik Sekali	Baik	Dapat Diterima
Kecil	< 1000	4,5 < s ≤ 5,5	5,5 < s ≤ 6,5	6,5 < s ≤ 8,5
Sedang	1000 - 3000	3,5 < s ≤ 4,5	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: SNI-03-2834-2000

Tabel 3.6 Nilai Deviasi Standar untuk berbagai tingkat Pengendalian Mutu Pekerjaan

Tingkat Pengendalian Mutu Pekerjaan	Sd (MPa)
Memuaskan	2.8
Sangat Baik	3.5
Baik	4.2
Cukup	5.6
Jelek	7,0
Tanpa Kendali	8.4

Sumber: SNI-03-2834-2000

3. Mencari/menghitung nilai tambah untuk kuat desak rencana (M) dihitung dengan rumus:

$$M = 1,64 \cdot sd \cdot k \quad (3.8)$$

Faktor pengali (k) deviasi standar dapat diketahui dari Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Faktor Pengali (k) Deviasi Standar

Jumlah Data	≥ 30	25	20	15	< 15
Faktor Pengali	1,00	1,03	1,08	1,15	-

Catatan : Bila jumlah data hasil uji kurang dari 15, maka nilai tambah (M) diambil tidak kurang dari 12 MPa

4. Menghitung kuat desak beton rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}) dapat dihitung dengan rumus:

$$f_{cr} = f'_c + M \quad (3.9)$$

5. Menentukan jenis atau tipe semen yang digunakan.
 6. Menentukan jenis atau tipe agregat yang digunakan.
 a. Agregat halus (pasir) alami.
 b. Agregat kasar (kerikil) batu pecah.
 7. Menentukan faktor air semen (FAS)

- a. Dengan menggunakan tabel

Menentukan nilai kuat tekan pada umur 28 hari sesuai dengan semen dan agregat yang dipakai. Tabel 3.8 di bawah ini menunjukkan perkiraan kuat desak beton dengan FAS = 0,5.

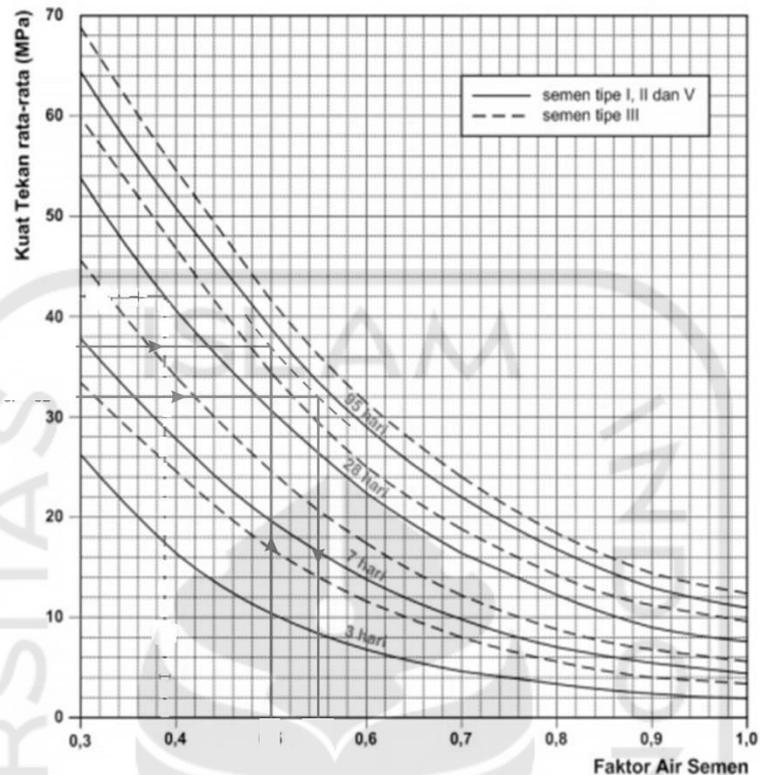
Tabel 3.8 Perkiraan kekuatan tekan (MPa) beton dengan FAS = 0,5

Jenis Semen	Jenis Agregat Kasar	Kekuatan Tekan (MPa)				Betuk Benda Uji
		Pada Umur (Hari)				
		3	7	28	95	
Semen Portland Tipe I	Batu tak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu Pecah	19	27	37	45	
Semen Tahan Sulfat Tipe II, V	Batu tak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu Pecah	25	32	45	54	
Semen Portland 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



b. Dengan menggunakan grafik (lihat Gambar 3.7)



Gambar 3.7 Hubungan Antara Kuat Desak dan Faktor Air Semen (FAS).
(Benda Uji Berbentuk Silinder Dengan Diameter 150 mm ×
Tinggi 300 mm)

Cara menggunakan grafik.

- 1) Pada Gambar 3.7 di atas, tarik garis horizontal dari f'_c yang diperoleh dari Tabel 3.8 dan garis vertikal dari FAS yang diperoleh dari Tabel 3.8 (FAS = 0,5), kemudian temukan pada suatu titik
 - 2) Dari titik tersebut, buatlah garis kurva bayangan yang sejajar dengan garis-garis kurva yang telah ada pada grafik tersebut
 - 3) Kemudian, tarik garis horizontal dari f_{cr} yang diperoleh dari perhitungan sampai menyentuh garis kurva bayangan yang telah dibuat tadi
 - 4) Kemudian, tarik garis vertikal ke bawah untuk menentukan nilai FAS
- Nilai FAS tersebut harus memenuhi persyaratan jumlah semen minimum dan faktor air semen maksimum yang tercantum dalam Tabel 3.5 berikut. Jika nilai FAS ternyata lebih tinggi dari nilai FAS maksimum

yang tercantum di dalam Tabel 3.9, maka nilai FAS yang dipakai adalah nilai FAS maksimum yang tercantum di dalam Tabel 3.9. Tetapi jika FAS yang didapatkan lebih rendah, maka nilai FAS yang digunakan adalah nilai FAS yang terkecil.

Tabel 3.9 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Dalam Lingkungan Khusus

Lokasi	Jumlah Semen Minimum Per m ³ Beton (Kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan: a. Keadaan keliling non-korosif b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensi atau uap korosif	275 325	0,60 0,52
Beton di luar ruangan bangunan: a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325 275	0,60 0,60
Beton masuk ke dalam tanah: a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah	325 Lihat Tabel 5 (SNI)	0,55 Lihat Tabel 5 (SNI)
Beton yang kontinu berhubungan: a. Air tawar b. Air laut	Lihat Tabel 5 (SNI)	Lihat Tabel 5 (SNI)

Sumber: SNI-03-2834-2000

8. Menentukan nilai slump rencana.
9. Menetapkan ukuran agregat maksimum.
10. Menentukan nilai kadar air bebas dihitung dengan rumus:

$$\text{Kadar air bebas} = \frac{2}{3} \times W_h + \frac{1}{3} \times W_k \quad (3.10)$$

Dengan:

W_h = Perkiraan jumlah air untuk agregat halus

W_k = Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar

Nilai W_h dan W_k diperoleh dari Tabel 3.10 berikut.

Tabel 3.10 Perkiraan Kadar Air Bebas Tiap Meter Kubik Beton

Ukuran besar butir agregat maksimum (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

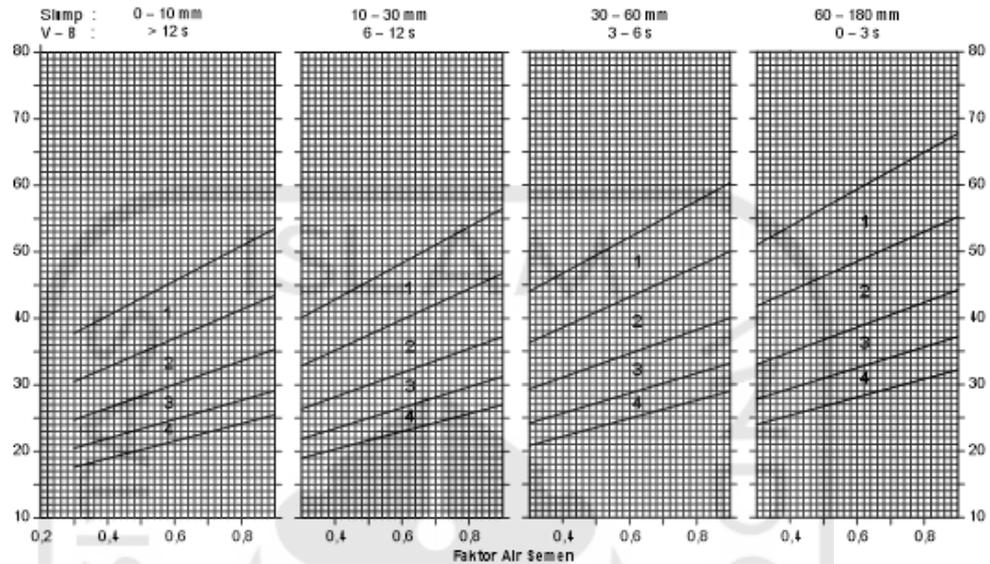
Sumber: SNI-03-2834-2000

11. Jumlah semen yang dipakai per m^3 beton
 - a. Dengan menggunakan tabel
Tabel yang digunakan adalah Tabel 3.9 yang telah tertera di atas dalam perhitungan nilai FAS dan kondisi lingkungan beton.
 - b. Dengan menggunakan rumus:

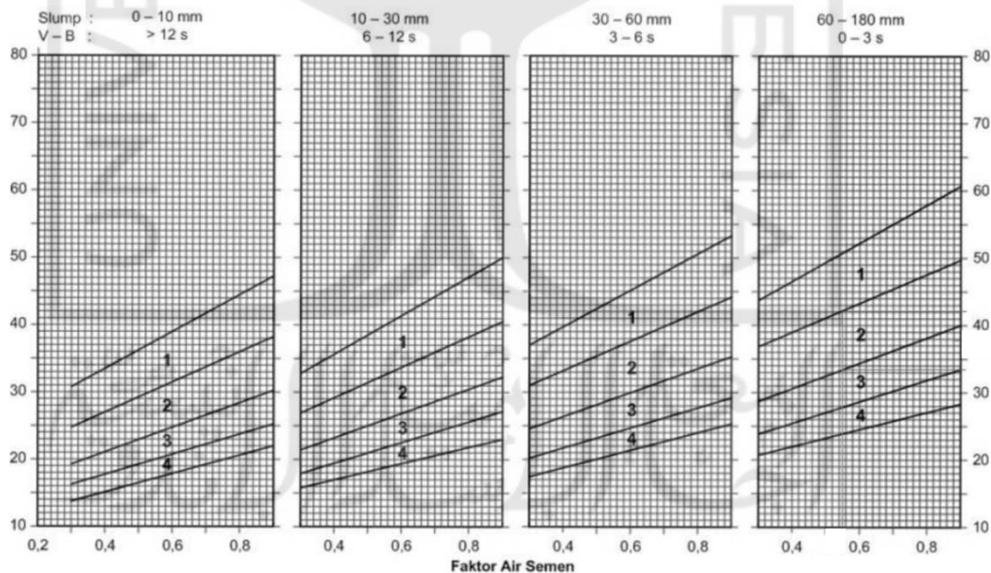
$$\text{Jumlah semen minimum per } m^3 \text{ beton} = \frac{\text{Kadar air bebas}}{\text{FAS}} \quad (3.11)$$

Dari kedua cara tersebut dipakai jumlah semen minimum per m³ beton.

12. Menentukan persentase agregat halus dan agregat kasar dengan menggunakan grafik berikut (lihat Gambar 3.8 dan Gambar 3.9).



Gambar 3.8 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Maksimum 20 mm



Gambar 3.9 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat Yang Dianjurkan Untuk Ukuran Maksimum 40 mm

Cara menggunakan grafik.

- Pada Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 di atas, tentukan grafik yang akan dipakai berdasarkan ukuran maksimum agregat dan nilai slump yang direncanakan.
- Tarik garis vertikal ke atas sampai ke kurva yang paling atas diantara 2 kurva yang menunjukkan daerah gradasi pasir.
- Kemudian, tarik garis horizontal ke kanan, baik kurva batas atas maupun kurva batas bawah yang berada di daerah gradasi dan catat nilainya
- Ambil rata-rata dari kedua nilai tersebut

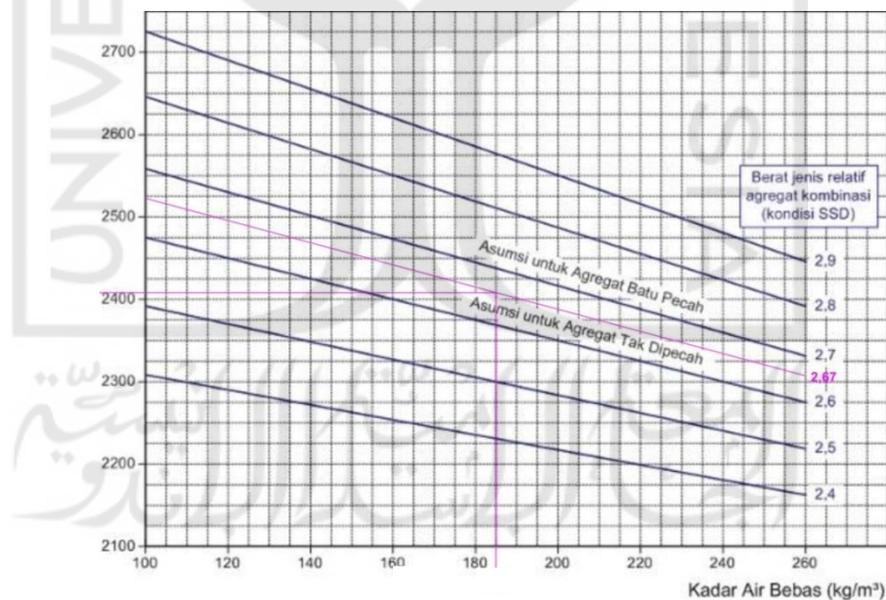
Untuk nilai persentase agregat kasar dihitung dengan rumus:

$$\text{Nilai prosentase agregat kasar} = 100\% - \text{Persentase agregat halus} \quad (3.12)$$

- Menghitung berat jenis gabungan dengan rumus:

$$BJ_{\text{ag.gab}} = \left(\frac{\% \text{ ag.halus}}{100} \times BJ_{\text{ag.halus}} \right) + \left(\frac{\% \text{ ag.kasar}}{100} \times BJ_{\text{ag.kasar}} \right) \quad (3.13)$$

- Mencari nilai berat isi beton dengan menggunakan grafik berikut (lihat Gambar 3.10).



Gambar 3.10 Perkiraan Berat Beton Basah Yang Telah Selesai Dipadatkan

Cara menggunakan grafik.

- a. Pada Gambar 3.10 di atas, tarik garis sesuai dengan nilai berat jenis agregat gabungan sejajar dengan garis linier yang telah ada pada grafik
- b. Tarik garis vertikal ke atas sampai memotong garis yang telah dibuat tadi sesuai dengan nilai kadar air bebas. Kemudian tarik garis horizontal ke kiri pada perpotongan kedua garis di atas dan catat nilainya.

15. Menghitung kadar agregat gabungan dihitung dengan rumus:

$$\text{Kadar agregat gabungan} = \text{berat isi beton} - \text{kadar semen} - \text{kadar air bebas} \quad (3.14)$$

16. Menghitung kadar agregat halus dihitung dengan rumus:

$$\text{Kadar agregat halus} = \frac{\% \text{ agregat halus}}{100} \times \text{kadar agregat gabungan} \quad (3.15)$$

17. Menghitung kadar agregat kasar dihitung dengan rumus:

$$\text{Kadar agregat kasar} = \frac{\% \text{ agregat kasar}}{100} \times \text{kadar agregat gabungan} \quad (3.16)$$

18. Menghitung Proporsi campuran (agregat dalam kondisi SSD)

Dari hasil perhitungan di atas, maka didapatkan susunan campuran proporsi teoritis untuk setiap 1 m³ beton.

19. Menghitung berat masing-masing bahan dalam setiap variasi campuran.
20. Menghitung berat serat karbon (*carbon fiber*) sebesar 0,4% dari berat beton normal.