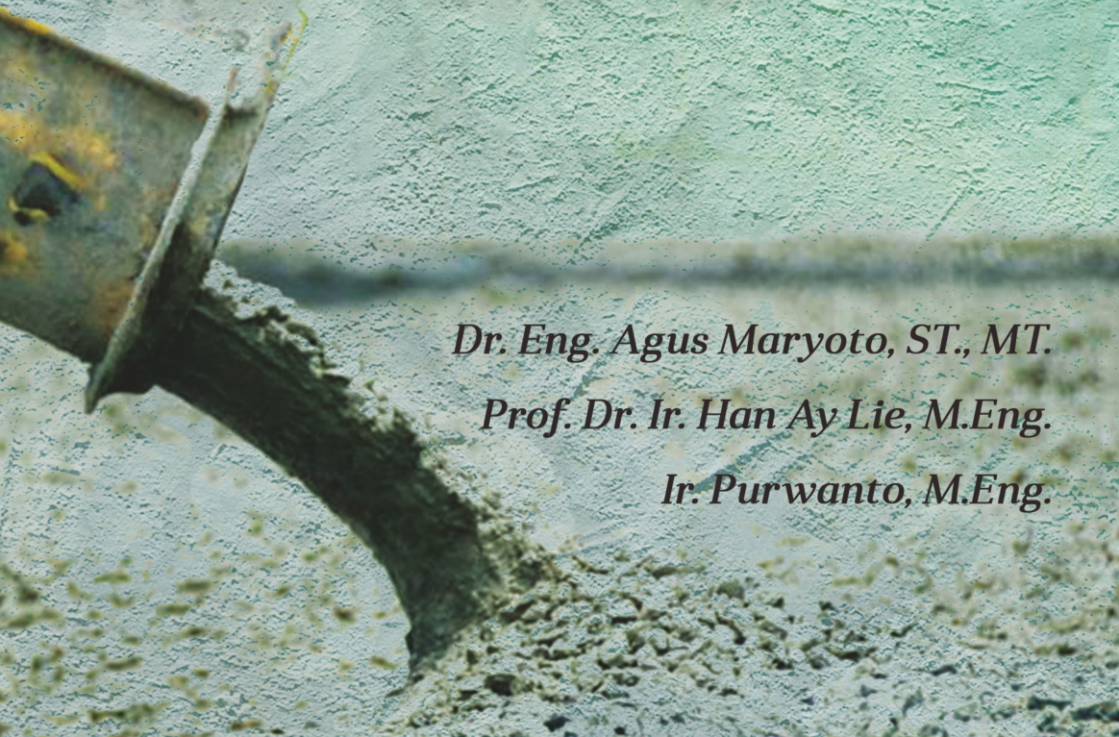
Pengantar
TEKNOLOGI BETON

PENGERTIAN, PENGUJIAN, PERILAKU DAN SIFAT MEKANIK



Dr. Eng. Agus Maryoto, ST., MT.
Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.
Ir. Purwanto, M.Eng.

Dr. Eng. Agus Maryoto, ST., MT.
Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.
Ir. Purwanto, M.Eng.

PENGANTAR TEKNOLOGI BETON

PENGERTIAN, PENGUJIAN, PERILAKU DAN SIFAT MEKANIK

Sebagai

MATA KULIAH
KEILMUAN DAN KETERAMPILAN

Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.
Ir. Purwanto, M.Eng.

PENGANTAR TEKNOLOGI BETON

PENGERTIAN, PENGUJIAN, PERILAKU DAN SIFAT MEKANIK

Sebagai

MATA KULIAH KEILMUAN DAN KETERAMPILAN

Penulis
Dr. Eng. Agus Maryoto, ST., MT.
Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.
Ir. Purwanto, M.Eng.

ISBN
978-602-60701-8-0

Penelaah Isi
Dr. Nor Intang Setyo Hermanto, ST., MT.

Penyelaras Bahasa
Mochammad Machfudz, SS., MSi

Desain Cover
Johana Melina Susanto

Layouter
Tim Redaksi

Penerbit
CV. MARKUMI

Redaksi
Gondang, Candi, Ampel RT.02/RW.04
No.23 Boyolali, Kotak Pos 57352
Mobile. 08174 60004
Email. markumidotcom@gmail.com

Cetakan I, Juni 2018

© Hak Cipta dilindungi Undang-undang
All Rights Reserved

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR
DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNSOED

Beton adalah bahan bangunan konstruksi yang paling banyak digunakan, hal ini karena kelebihan yang dimiliki oleh beton dibandingkan dengan bahan bangunan konstruksi lainnya. Kekuatan beton tidak hanya ditentukan oleh material bahan penyusunnya, tetapi juga ditentukan oleh komposisi bahan dan proses pembuatannya. Sehingga dalam penggunaan sebagai bahan konstruksi, pengetahuan tentang bahan, proses pembuatan, pengujian dan perilaku beton harus dipelajari dan dipahami dengan baik, agar konstruksi beton yang kita buat menjadi kuat dan aman.

Oleh karena itu, saya menyambut dengan baik disusunnya *Buku Pengantar Teknologi Beton* ini yang merupakan hasil kerjasama antara Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Unsoed dengan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Undip. Buku ajar ini tentunya akan sangat membantu mahasiswa Teknik Sipil untuk mempelajari dan memahami pengetahuan tentang Teknologi Beton. Buku ini membahas secara lengkap mulai dari pengetahuan material bahan, cara pembuatan beton, pengujian sifat fisik dan sifat mekanik hingga bahan tambah yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa beton. Penjelasan yang ringkas dengan disertai gambar ilustrasi serta latihan soal pada setiap pokok bahasan sangat membantu mahasiswa untuk mempelajari dan memahami materi buku ini.

Harapan saya, semoga buku ini dapat menjadi salah satu buku bahan ajar Teknologi Beton bagi mahasiswa Teknik Sipil untuk mencapai kompetensi lulusan yang diharapkan.

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Jenderal Soedirman

Nastain

KATA PENGANTAR
DEKAN FAKULTAS TEKNIK UNDIP

Industri konstruksi sangat dinamis dan menjadi salah satu yang berkontribusi pada GDP atau *Gross Domestic Prooduct* di Indonesia. Perubahan fenomena serta pengetahuan yang lebih maju terhadap teknologi material menjadi isu yang sangat penting. Hal ini membawa tingkat persaingan pada industri konstruksi menjadi lebih tinggi. Kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi serta produktivitas yang lebih baik dalam menyelesaikan proyek konstruksi menjadi hal yang harus dilakukan oleh para pelaku di dalam industri konstruksi.

Pemahaman terhadap material beton sebagai salah satu material utama dalam proses konstruksi menjadi sangat penting. *Buku Pengantar Teknologi Beton* yang telah berhasil diterbitkan ini semoga menjadi tonggak yang penting dalam proses pengetahuan dan pendidikan di dunia konstruksi.

Buku ini, menyajikan secara runtut pada sudut pandang konseptual, filosofis serta dilengkapi contoh-contoh yang sangat baik guna menjelaskan Struktur Beton. Pengetahuan dasar, contoh perhitungan dan aplikasi Struktur Beton dibahas dengan sangat baik. Penyajian dan *layout* yang dirancang secara sempurna menjadikan buku ini enak dibaca serta mudah dipahami bagi para pelaku industri konstruksi serta bagi para mahasiswa yang berminat pada mata kuliah Struktur Beton.

Akhir kata, terima kasih kepada penulis yang telah menyumbangkan pikiran dan hasil-hasil penelitian yang telah disarikan dengan baik, sehingga memperkaya khasanah pengetahuan di bidang Struktur Beton dan dunia konstruksi di Indonesia.

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro

Ir. Mochamad Agung Wibowo, MM., MSc., Ph.D.

DAFTAR ISI

Halaman Judul i
Kata Pengantar iii
Daftar Isi v
Bab 1. Semen *Portland* 1
1.1 Pendahuluan 1
1.2 Proses Pembuatan Semen 2
1.3 Syarat Kimia dan Fisika Semen 5
1.4 Rangkuman 8
1.5 Latihan 9

Bab 2. Beton 11
2.1 Pendahuluan 11
2.2 Bahan Penyusun 12
2.3 Jenis dan Sifat Fisik Beton 13
2.4 Rangkuman 14
2.5 Latihan 14

Bab 3. Kekuatan Tekan Beton 15
3.1 Pendahuluan 15
3.2 Parameter Benda Uji 18
3.3 Rangkuman 30

Bab 4. Pengaruh Agregat, Mortar dan Interfasa 31
4.1 Agregat 31
4.2 Semen dan Mortar 33
4.3 Interfasa 39
4.4 Rangkuman 41
4.5 Latihan 41

Bab 5. Kekuatan Tarik Beton 43
5.1 Kuat Tarik 43
5.2 Uji Tarik Langsung 44
5.3 Uji Tarik Tidak Langsung 44
5.4 Rangkuman 46

Bab 6. Beton Segar dan Beton Keras 47
6.1 Beton Segar 47
6.2 Kriteria Jangka Pendek 47
6.3 Kriteria Jangka Panjang 49
6.4 Perkembangan Beton sebagai Elemen Struktur 49
6.5 Susut dan Rangkak 52
6.6 Rangkuman 56

Bab 7. Bahan Tambah (*Additive*) 57
7.1 Bahan Tambah 57
7.2 Jenis *Admixtures* 57
7.3 Rangkuman 65
7.4 Latihan 65

Bab 8. Soal dan Penyelesaian 67
Daftar Pustaka 93

BAB 1
SEMEN *PORTLAND*

Tujuan Umum:

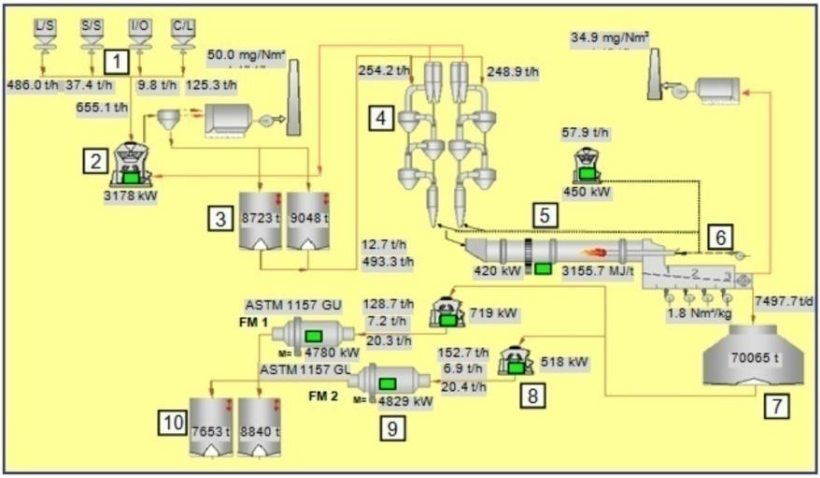
1. Mahasiswa mengetahui proses pembuatan semen.
2. Mahasiswa mengenal dan memahami jenis-jenis semen.

Tujuan Khusus:

1. Mahasiswa mengetahui material-material dan alat untuk produksi semen.
2. Mahasiswa mengetahui syarat-syarat kimia dan fisik setiap jenis semen.

1.1 PENDAHULUAN

Semen merupakan bahan utama untuk mengikat material-material penyusun beton. Semen akan bereaksi dengan air dalam proses hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat ($C_3S_2H_8$ *atau* C-S-H) sehingga bisa terbentuk beton keras. Material-material penyusun beton seperti semen, pasir, batu pecahakan membentuk suatu massa yang padat dalam waktu tertentu. Jadi mutu suatu beton sangat ditentukan oleh kualitas semen yang digunakan. Proses pembuatan semen bisa dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Proses Produksi Semen (PT. Holcim Indonesia Tbk)

1.2 PROSES PEMBUATAN SEMEN

Berdasarkan Gambar 1.1 dapat dijelaskan fungsi-fungsi peralatan yang digunakan untuk memproduksi semen adalah sebagai berikut:

1. *Weight Feeder*

Weight feeder adalah suatu alat untuk menimbang material batu kapur (*lime stone*), tanah liat (*clay*), pasir besi (*iron sand*) dan pasir silica (*silica sand*). Alat ini dilengkapi dengan suatu sensor yangbisa menimbang perbandingan material-material yang akan digiling di *raw mill*. Batu kapur, tanah liat, pasir besi dan pasir silika bisa dilihat pada Gambar 1.2. Material ini ditambang dari area pertambangan terbuka yang kandungannya disesuaikan dengan jumlah oksida yang diperlukan untuk memproduksi *clinker*.

Batu Kapur

Tanah Liat

Pasir Besi

Pasir Silika

Gambar 1.2. Material Penyusun Clinker

2. *Raw Mill*

Raw mill adalah alat yang digunakan untuk menggiling atau melembutkan material batu kapur, tanah liat, pasir besi dan pasir silika. Hasil penggilingan material ini disebut *raw meal* (bahan mentah) yang selanjutnya disimpan di dalam *blending silo*. Ukuran partikel *raw meal* sangat halus, melalui proses penyaringan di *bag filter* yang ada di *raw mill*, material gas dan *raw meal* dapat dipisahkan. Gambar *raw meal* dapat dilihat dalam Gambar 1.3. *Raw meal* berwarna kuning muda dengan gradasi butiran sangat halus.

3. *Blending Silo*

Blending silo adalah silo berbentuk silinder yang di dalamnya ada suatu peralatan yang berfungsi untuk menghomogenkan *raw meal*. Selain berfungsi sebagai penghomogen *raw meal*, *blending silo* juga merupakan tempat untuk menampung *raw meal* dalam jumlah besar. *Raw meal* ini merupakan umpan untuk pembuat *Clinker*.

4. *Cyclone Preheater*

Cylcone preheater merupakan suatu sistem alam yang terdiri dari 3 sampai 5 *cyclone* yang berfungsi memanaskan *raw meal* lebih dulu, sebelum diumpankan ke *kiln*. Selama di dalam *cyclone preheater*, *raw meal* akan mengalami *pyro process* dan akan menghasilkan kalsinasi sekitar 90% dan suhu yang terjadi pada pada *raw meal* sekitar 850^{o}C.

5. *Kiln*

Raw meal yang sudah terkalsinasi di *cyclone preheater*, akan dibakar lagi dan suhunya naik sampai sekitar 1450^{o}C di *kiln*. *Kiln* merupakan silinder yang berputar dari dinding baja yang bagian dalamnya dilapisi batu tahan api, sehingga panas yang timbul didalam *kiln* setinggi 1450^{o}C tidak merambat ke dinding baja *kiln*. Bahan bakar yang digunakan untuk pembakaran di *kiln* yaitu batu baru yang sudah digiling menjadi halus. Gambar 2.b dan 2.c menunjukkan batu bara (*raw coal*) dan batu bara yang sudah dihaluskan (*fine coal*).

a.

b.

c.

Gambar 1.3. a. Raw Meal, b. Raw Coal, c.Fine Coal

6. *Cooler*

Cooler adalah suatu alat dengan sistem pendingin yang di dalamnya yang berguna mendinginkan secara mendadak *Clinker* yang keluar dari *kiln*. *Clinker* yang sudah berada di *Cooler* suhunya akan turun menjadi sekitar 120^{o}C. *Clinker* ini merupakan bahan utama untuk membuat semen. Gambar 1.4 menunjukkan butir *Clinker* yang siap disimpan di *clinker storage*.

Gambar 1.4. Clinker

7. *Clinker Storage*

Clinker storage merupakan tempat peyimpanan *clinker*. Produk *clinker* ini bisa langsung diekspor atau diproses lebih lanjut menjadi semen.

8. Vertical Mill

Vertical Mill merupakan alat penggiling butiran *clinker* sehingga ukurannya menjadi lebih kecil. Alat ini berupa penggiling dengan posisi berdiri atau *vertical mill.*

9. *Finish Mill*

Finish Mill adalah suatu alat penggiling bahan penyusun semen yang terdiri dari *clinker, gypsum, pozzolan*, dan *fly ash* dengan perbandingan

tertentu. Agar bisa menggiling, *finish mill* ini berisi ribuan bola baja dengan berbagai ukuran. Gambar 1.5.a, b, c berturut-turut menunjukkan gambar *gypsum artificial*, *pozzolan* dan *fly ash*. Setelah bahan-bahan ini digiling kemudian melalui penyaringan dengan kehalusan tertentu, terbentuklah semen dengan kehalusan butiran sesuai dengan persyaratan. Semen ini selanjutnya ditampung di *Cement Storage*. Gambar 1.5.d menunjukkan semen yang dihasilkan dari *Finish Mill*.

a. b. c. d.

Gambar 1.5. a. Gypsum, b. Pozzolan, c. Fly ash, d. Semen

10. *Cement Storage*

Cement storage berfungsi untuk menyimpan semen. Semen yang ada di *cement storage* biasanya masih mempunya suhu di atas 50^{o}C. Semen bisa dijual dalam bentuk curah maupun dikantongi dengan berat 50 kg per kantong semen, seperti yang kita kenal saat ini. Semen curah biasanya digunakan atau dijual ke perusahaan *ready mix concrete* dan pabrik beton pracetak.

1.3 SYARAT KIMIA DAN FISIKA SEMEN

Berdasarkan SNI-2049-2015 ada 5 jenis semen yaitu semen Jenis I, II, III, IV dan V. Semen jenis I semen *Portland* yang dalam penggunaannya tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain. Jenis II yaitu semen *Portland* yang dalam pengguna-

annya memerlukan ketahanan teradap sulfat atau kalor hidrasi sedang. Jenis III yaitu semen *Portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi. Jenis IV yaitu semen *Portland* yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah. Jenis V yaitu sement *Portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat. Syarat kimia semen seperti pada Tabel 1.a dan 1.b serta syarat fisika semen seperti pada Tabel 2.a dan 2.b.

Tabel 1.a. Syarat Kimia Utama

No	Uraian	Jenis Semen *Portland*				
		I	II	III	IV	V
1	SiO_2, minimum	-	20.0 [b,c)]	-	-	-
2	Al_2O_3, maksimum	-	6.0	-	-	-
3	Fe_2O_3, maksimum	-	6.0 [b,c)]	-	6.5	-
4	MgO, maksimum	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
5	SO_3, maksimum Jika $C_3A \leq 8,0$ Jika $C_3A > 8,0$	3.0 3.5	3.0 [d)]	3.5 4.5	2.3 [d)]	2.3 [d)]
6	Hilang pijar, maksimum	5.0	3.0	3.0	2.5	3.0
7	Bagian tak larut, maksimum	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5
8	C_3S, maksimum [a)]	-	-	-	35 [b)]	-
9	C_2S, minimum [a)]	-	-	-	40 [b)]	-
10	C_3A, maksimum [a)]	-	8.0	15	7 [b)]	5 [b)]
11	$C_4AF + 2C_3A$ atau [a)] $C_4AF + C_2F$, maksimum	-	-	-	-	25

a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak harus diartikan bahwa oksida dari senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan, maka syarat kimia ini tidak berlaku.

c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuaian karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan, maka syarat kimia ini tidak berlaku.

d) Tidak dapat dipergunakan.

Tabel 1.b. Syarat Kimia Tambahan[a)]

No.	Uraian	Jenis Semen *Portland*				
		I	II	III	IV	V
1	C_3A, maksimum	-	-	8	-	-
2	C_3A, minimum	-	-	5	-	-
3	($C_3S + 2C_3A$), maksimum	-	58[b)]	-	-	-
4	Alkali, sebagai ($Na_2O + 0.658K_2O$), maksimum	0.6[c)]	0.6[c)]	0.6[c)]	0.6[c)]	0.6[c)]

a) Syarat kimia tambahan ini berlaku hanya secara khusus disyaratkan.

b) Sama dengan keterangan untuk [b)] pada syarat kimia utama.

c) Hanya berlaku bila semen digunakan dalam beton yang agregatnya bersifat reaktif terhadap alkali.

Tabel 2.a. Syarat Fisika Utama

No.	Uraian	Jenis Semen *Portland*				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m^2/kg dengan alat: - *Turbidimeter*, minimum - *Blaine*, minimum	 160 280	 160 280	 160 280	 160 280	 160 280
2	Kekekalan: Pemuaian dengan *autoclave*, maksimum (%)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
3	Kuat tekan: - Umur 1 hari, kg/cm^2, minimum - Umur 3 hari, kg/cm^2, minimum - Umur 7 hari, kg/cm^2, minimum - Umur 28 hari, kg/cm^2, minimum	 - 135 215 300	 - 100,70[a)] 175,120[a)] -	 120 240 - -	 - - 70 170	 - 80 150 210
4	Waktu pengikatan (*metode alternative*) dengan alat: a. *Gillmore* - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum b. *Vicat* - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum	 60 600 45 375	 60 600 45 375	 60 600 45 375	 60 600 45 375	 60 600 45 375

a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan atau jika syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan.

Tabel 2.b. Syarat Fisika Tambahan

No.	Uraian	Jenis Semen *Portland*				
		I	II	III	IV	V
1	Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum	50	50	50	50	50
2	Kalor hidrasi - Umur 7 hari, kal/gram, maksimum - Umur 28 hari, kal/gram, maksimum	 - -	 70 -	 - -	 60 70	 - -
3	Kuat tekan: - Umur 28 hari, kg/cm^2, minimum	-	280	-	-	-
4	Pemuaian karena sulfaat 14 hari, %, maksimum	-	220	-	-	0.04
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.

b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel kimia tambahan tidak diperlukan.
Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan atau bila syarat $C_3S + C_3A$ seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan.

1.4 RANGKUMAN

- Bahan untuk membuat *clinker* yaitu batu kapur, tanah liat, pasir besi dan pasir silika.
- Semen dibuat dari *clinker*, *pozzolan*, *gypsum* dan *fly ash* digiling bersama-sama sampai dengan kehalusan tertentu.
- Ada 5 tipe semen yang biasa digunakan dalam struktur bangunan sipil untuk penggunaan dalam kondisi normal, tahan sulfat dan panas hidrasi sedang, kuat tekan awal yang tinggi, panas hidrasi rendah dan tahan terhadap sulfat yang tinggi.

1.5 LATIHAN

1. Sebutkan bahan-bahan penyusun *Clinker*!
2. Berapa besar suhu yang diperlukan untuk membuat *Clinker*?
3. Material apa yang digunakan untuk dicampurkan dengan semen sehingga terbentuk semen?
4. Ada berapa jenis bentuk penjualan semen?
5. Berapa lama waktu ikat awal semen tipe 1?
6. Berapa lama waktu ikat akhir semen tipe 1?
7. Berapa besar kuat tekan mortar umur 28 hari untuk semen tipe 1?
8. Berapa besar kehalusan semen tipe 1 sesuai SNI bila diukur dengan alat *Blaine*?
9. Berapa besar kandungan MgO di dalam semen yang diijinkan?
10. Berapa besar hilang pijar semen tipe 1 yang diijinkan?

BAB 2
BETON

Tujuan Umum:

1. Mahasiswa mengetahui tentang struktur dan bahan-bahan penyusun beton.

Tujuan Khusus:

1. Mahasiswa mengetahui sifat fisis dan mekanis beton.
2. Mahasiswa mengetahui kelebihan dan kekurangan beton.

2.1 PENDAHULUAN

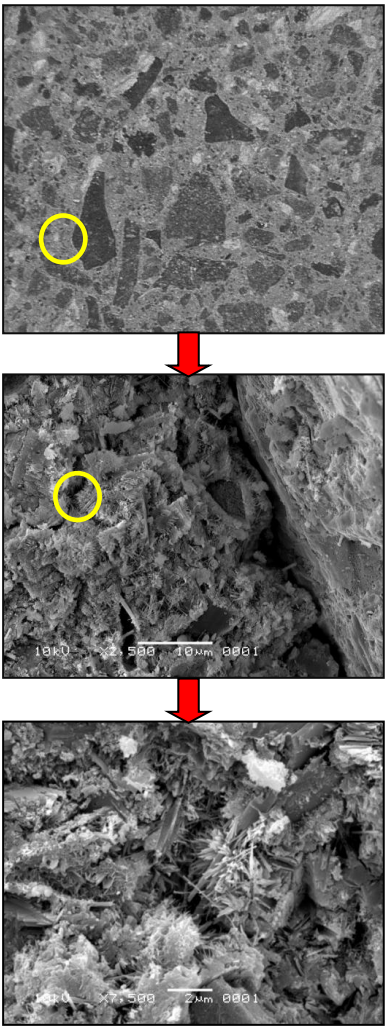
Bahan bangunan konstruksi yang paling banyak digunakan di Indonesia adalah beton. Beton merupakan material yang diperoleh dari penggabungan agregat (pasir dan batu pecah / *split* (*crushed stone*)) yang diikat oleh bahan semen. Semen akan bereaksi bila dicampur dengan air, membentuk pasta semen yang akan mengeras (Gambar 2.1).

Kelebihan bahan beton:

1. Ketahanan terhadap air.
2. Kemudahan pembuatan dan pemberian bentuk.
3. Murah, mudah, dan menyerap tenaga.
4. Hampir tidak membutuhkan perawatan.
5. Tahan air dan temperatur tinggi.

Kekurangan bahan beton:

1. Bahan bongkaran tak dapat digunakan kembali.
2. Proses pembuatan semen mengakibatkan polusi.
3. Penggunaan pasir dan batuan alam akan mengganggu ekologi.
4. Berat sendiri struktur tinggi (2400 kg/m^3).



Gambar 2.1. Pembacaan SEM (Scanning Electron Microscope) Material Beton dari Tampak Mata, Perbesaran 2.500x dan 7.500x

2.2 BAHAN PENYUSUN

1. Agregat

Agregat dapat berupa batu belah, kerikil, kericak atau pasir yang merupakan unsur utama pembentuk beton.

Agregat kasar adalah agregat dengan ukuran > 4.75 mm.

Agregat halus adalah agregat dengan ukuran ≤ 4.75 mm.

2. Pasta Semen

Pasta semen adalah campuran antara semen dan air.

3. Mortar

Mortar adalah campuran semen, pasir, dan air, disebut juga matrix beton.

4. Semen

Semen adalah material pengikat yang akan mengeras (hidrasi) bila bereaksi dengan air. Semen yang paling banyak digunakan adalah semen *Portland* yang pada dasarnya terdiri dari *calcium silicate*. *Calcium Silicate Hydrate* yang terbentuk selama proses hidrasi merupakan bahan pengikat utama. Informasi lebih detail bisa dilihat pada web *"Portland Cement Association",* (http://www.cement.org/).

5. *Additive* atau *Admixtures:*

Bahan ini adalah bahan tambahan yang bukan merupakan komponen wajib untuk beton. *Additive* digunakan sebagai bahan untuk memperbaiki sifat-sifat beton, misalnya:

- *Additive* yang mempengaruhi waktu ikat semen (*accelerator* dan *retarder*).
- *Water reducer* dan *superplasticizer*, untuk mengurangi kebutuhan air tapi tetap memberikan kelacakan (*workability*) baik.
- *Pozzolan* (silika reaktif) mengurangi retak mikro akibat panas.

Salah satu produsen *additive* yang ada di Indonesia adalah SIKA (http:// idn.sika.com).

2.3 JENIS DAN SIFAT FISIK BETON

Berdasarkan ***massa jenis*** beton dibedakan menjadi:

- *Normal weight concrete*: beton jenis ini akan mempunyai massa jenis, $\gamma = \pm 2400\ kg/m^3$. Beton ini adalah yang paling umum digunakan.
- *Light weight concrete*: bila dibutuhkan rasio kuat terhadap berat yang tinggi. Untuk mencapai beton dengan massa jenis rendah, kita akan gunakan agregat ringan. Massa jenis beton ringan sekitar $\gamma < 1800\ kg/m^3$.

- *Heavy weight concrete*: beton ini digunakan pada kondisi khusus, seperti misalnya untuk perlindungan radiasi, atau struktur yang mengandalkan berat konstruksi (Pemecah gelombang, pondasi blok). Massa jenis beton berat adalah $\gamma > 3200\ kg/m^3$. Beton berat diproduksi dengan menggunakan agregat berat, atau biji besi sebagai material penyusun.

Berdasarkan ***kekuatan tekan***, beton dibedakan menjadi :

- Beton mutu rendah, memiliki kuat tekan karakteristik $f'c < 20\ MPa$.
- Beton normal (beton biasa) memiliki kuat tekan karakteristik $20 \leq f'c \leq 40\ MPa$.
- Beton mutu tinggi memiliki kuat tekan karakteristik $f'c > 40\ MPa$.

Selain itu perkembangan teknologi beton sekarang menghasilkan beragam jenis beton "modifikasi" seperti *fiber concrete*, *expansive concrete*, *high performance concrete*, dan lain-lain.

2.4 RANGKUMAN

- Beton merupakan batuan buatan yang disatukan oleh bahan pengikat semen. Pada perbesaran tampak bahwa semen membentuk kristal-kristal dalam beton.
- Sifat fisik beton dipengaruhi material dasarnya, sehingga berat sendiri tinggi.
- Beton dapat dibedakan berdasarkan massa jenisnya dan kuat tekannya.

2.5 LATIHAN

1. Sebutkan bahan-bahan penyusun beton!
2. Apa yang disebut pasta semen?
3. Apa yang disebut mortar?
4. Apa perbedaan antara agregat kasar dan agregat halus?
5. Berdasarkan berat jenisnya, beton dikelompokkan menjadi berapa? Jelaskan!
6. Ada berapa jenis bila beton dikelompokkan berdasarkan kuat tekannya? Jelaskan!
7. Apakah fungsi *admixture* atau *additive* dalam beton?

BAB 3
KEKUATAN TEKAN BETON

Tujuan Umum:

1. Mahasiswa mengetahui sifat mekanik beton, bagaimana mengujinya dan faktor-faktor apa yang mempengaruhinya.

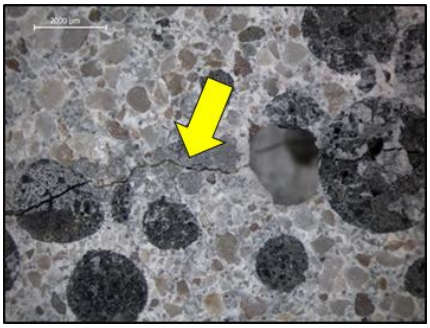
Tujuan Khusus:

1. Mahasiswa memahami metoda pengujian kuat tekan beton.
2. Mahasiswa memahami perilaku tegangan-regangan beton, pengertian *Modulus elastis*, *Poisson rasio* serta perilaku peningkatan kuat tekan sebagai fungsi waktu.

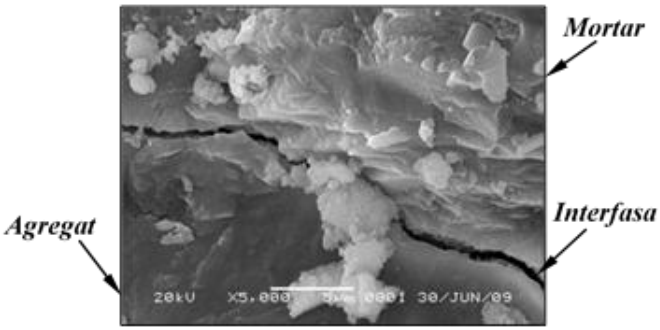
3.1 PENDAHULUAN

Kekuatan tekan beton merupakan salah satu andalan utama bahan ini. Kekuatan (*strength*) adalah kemampuan suatu bahan untuk memikul tegangan (*stress*) sampai runtuh. Dalam beton proses keruntuhan ditandai dengan terjadinya retak-retak mikro. Kuat tekan beton jauh lebih tinggi bila dibandingkan kuat tariknya, dengan demikian pemanfaatan beton terutama diarahkan pada sifat tekan tersebut. Kuat tekan beton selalu ditentukan pada usia 28 hari.

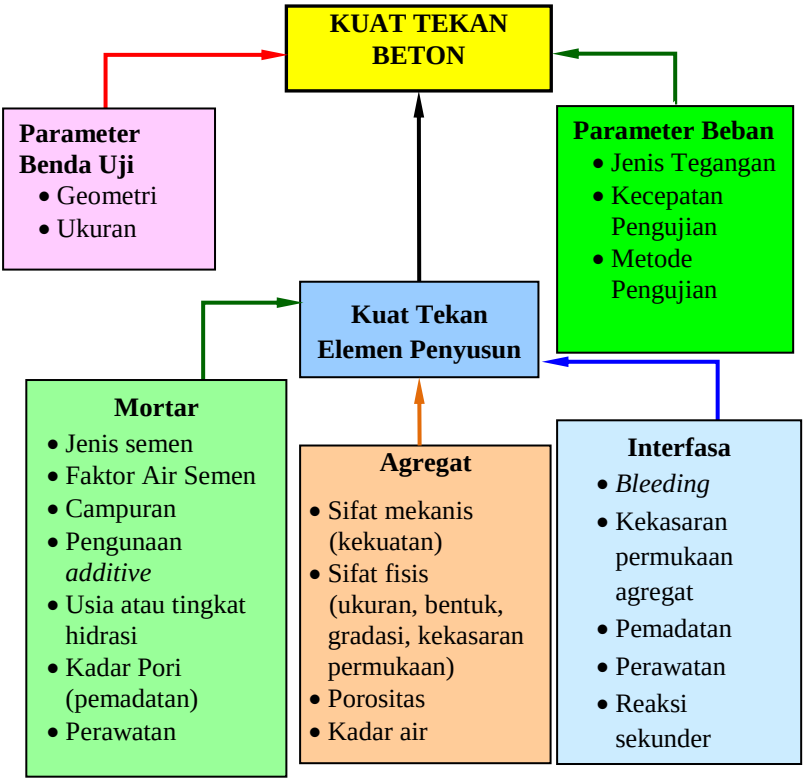
Komponen beton dapat kita pandang sebagai bahan komposit yang terbangun dari tiga elemen, agregat, mortar dan daerah interfasa (*interface*) antara agregat dan mortar (Gambar 3.1 dan 3.2). Ketiga komponen tersebut akan mempengaruhi kuat tekan beton yang terbentuk. Sifat masing-masing komponen yang membangun kuat tekan beton tersaji dalam diagram (Gambar 3.3).



Gambar 3.1. Retak Mikro pada Beton, Retak dapat Terjadi pada Agregat, Mortar Atau Interfasa



Gambar 3.2. Perbesaran 5.000x Menunjukkan Lepasnya Lekatan Mortar dan Agregat pada Interfasa



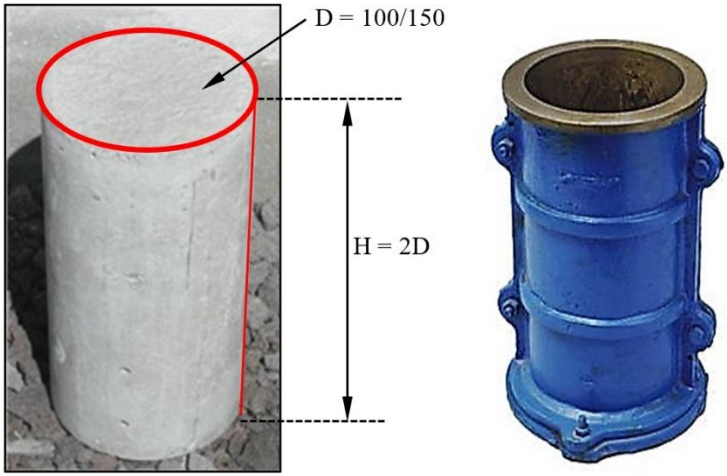
Gambar 3.3. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kuat Tekan Beton

3.2 PARAMETER BENDA UJI

3.2.2 Geometri

Kuat tekan beton diekspresikan dalam besaran tegangan hancur bahan (*ultimate compression strength*). Ada dua bentuk dasar benda uji yang digunakan untuk uji tekan:

1. **Silinder** (Gambar 3.4)

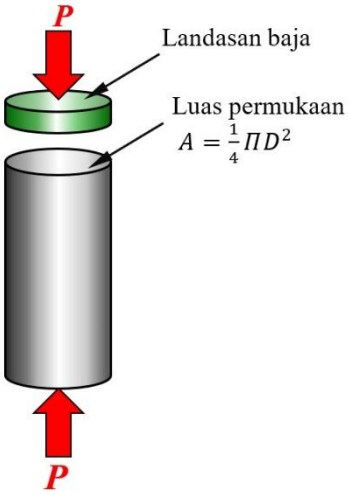


Gambar 3.4. Benda Uji Silinder dan Cetakan

Silinder berukuran 150 x 300 mm digunakan sebagai acuan oleh:

ASTM	(*American Standard Testing Materials*)
ACI	(*American Concrete Institute*)
SNI	(Standar Nasional Indonesia)

Sistem pengujian adalah dengan memberikan gaya tekan P melalui media yang kaku sempurna sehingga tekanan benar-benar merata (Gambar 3.5).



Gambar 3.5. Pengujian Silinder

Dengan demikian akan terjadi tegangan merata sebagai fungsi gaya dibagi luas permukaan, atau:

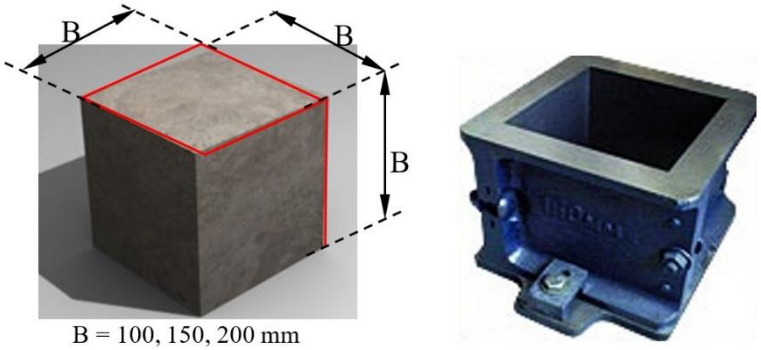
$$\text{Tegangan} = \frac{gaya}{satuan\ luas}$$

$$f'c = \frac{P}{A} = \frac{(Newton)}{(mm^2)} = \text{Mega Pascal (MPa)}$$

Gaya tekan terbesar yang menyebabkan hancurnya bahan disebut gaya tekan kritis (*critical load*), atau gaya tekan batas (*ultimate load*) atau gaya tekan hancur. Tegangan terbesar yang dapat dipikul sebuah bahan beton disebut tegangan karakteristik.

Misal: $f'c = 20\ MPa$ berarti beton dapat menahan 20 Newton setiap 1 mm^2 sebelum hancur.

2. Kubus (Gambar 3.6)



Gambar 3.6. Benda Uji Kubus dan Cetakan

Kubus yang digunakan sebagai acuan dalam PBI (Peraturan Beton Indonesia 1971) berukuran 150 x 150 x 150 mm.

$$\text{Tegangan} = \frac{gaya}{satuan\ luas}$$

$$K = \frac{P}{A} = \frac{(kilogram)}{(cm^2)} \qquad (3.2)$$

Misal $K = 200\ kg/cm^2$ berarti beton dapat menahan 200 kilogram setiap 1 cm^2 sebelum hancur.

- **Konversi Satuan**

Dengan gravitasi g = 10 m/sec^2:
1kg = 10 Newton
Sehingga:

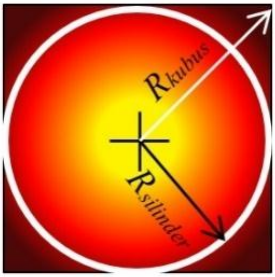
$$1\ \frac{kg}{cm^2} = \frac{10}{100}\frac{N}{mm^2}\ (MPa)$$

$$1\ \frac{kg}{cm^2} = \frac{1}{10}\ (MPa) \qquad (3.3)$$

Kecuali satuan, bentuk benda uji akan mempengaruhi tegangan hancur bahan. Dengan demikian benda uji silinder dan kubus yang terbuat dari bahan yang sama akan menghasilakan kuat tekan yang berbeda. Faktor-faktor bentuk yang mempengaruhi kuat tekan adalah:

- ***Sebaran Tegangan pada Permukaan***

Silinder mempunyai bentuk penampang *aksi-simetris*, artinya, penampang tersebut simetris pada sumbu memanjangnya. Pada kubus ujung-unjung penampang akam mempunyai jarak yang berbeda dari pusat masa penampang. Dengan demikian sebaran tegangan akan berbeda pula (Gambar 3.7).



Gambar 3.7. Sebaran Tegangan pada Penampang Benda Uji Kubus dan Silinder

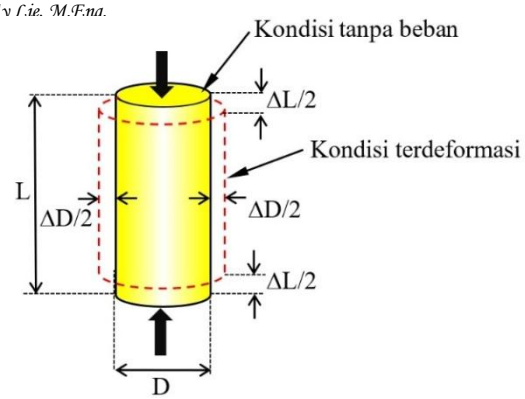
- ***Rasio Tinggi Terhadap Diameter***

Rasio ini mempengaruhi pola pecah penampang (Gambar 3.8). Rasio yang lebih besar juga akan menimbulkan pengaruh tekuk.

Akibat gaya tekan, maka benda uji akan mengalami perpendekan *(longitudinal).* Tetapi karena berlaku hukum kekekalan masa, maka benda uji akan melebar kearah samping *(lateral).* Regangan merupakan perbandingan antara perubahan panjang terhadap panjang semula. Dengan demikian, regangan lateral (tegak lurus gaya) dan longitudinal (searah gaya) dapat dihitung dari rumus-rumus:

$$\varepsilon_{lateral} = \frac{\Delta D}{D} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{longitudinal} = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.5)$$



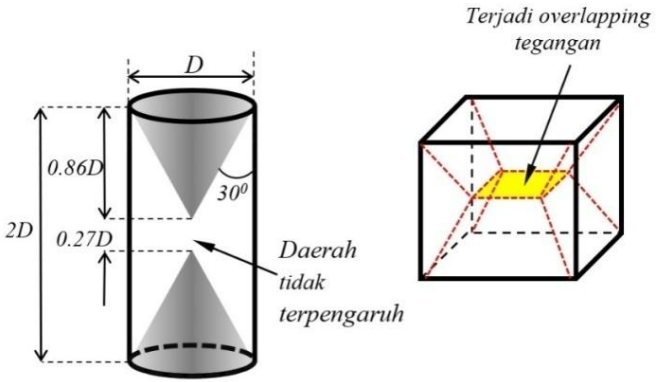
Gambar 3.8. Perilaku Perubahan Bentuk Akibat Gaya Tekan

Regangan tidak berdimensi, karena tidak bersatuan. Perbandingan antara regangan lateral dan longitudinal disebut angka *Poisson*.

(*Poisson's ratio*) mengabadikan nama penemu konsep ini, *Simeon Denis Poisson* yang hidup pada abad ke 18 di Perancis. Angka *Poisson* ditulis sebagai:

$$\upsilon = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}} \tag{3.6}$$

Akibat angka *Poisson* maka pola pecah benda uji akan berbeda, sebagai fungsi rasio tinggi terhadap diameternya. Pola pecah selalu akan mengikuti sudut 30^0, dengan demikian bidang retak pada kubus akan saling berpotongan, sedang pada silinder, kerucut bidang retak akan dapat terbentuk dengan sempurna (Gambar 3.9).



Gambar 3.9. Pola Pecah Terpengaruh Rasio Tinggi-Diameter

Akibat perilaku pola pecah, kubus selalu akan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, bila dibandingkan dengan silinder. Ini disebabkan karena *overlapping* dari kerucut tegangan mengakibatkan kekangan pada material. Standar normatif pengujian adalah kubus. Dengan demikian kuat tekan kubus diberi koefisien satu (1.0). Silinder akan mempunyai nilai kuat tekan 83% terhadap kubus, dengan demikian nilai koefisien silinder menjadi 0.83. Untuk mengkonversi hasil uji silinder menjadi kuat tekan kubus, perlu diadakan perkalian angka $\frac{1}{0.83}$. Penelitian terhadap benda uji silinder dengan H = 2D menunjukkan bahwa kuat tekan yang diperoleh hanya sekitar 75% bila dibandingkan kubus dengan H = D.

3.2.2 Pengaruh Ukuran

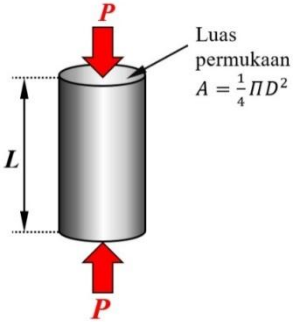
Kecuali pengaruh dari bentuk benda uji, ukuran atau dimensi benda uji juga akan mengakibatkan kuat tekan terukur berbeda. Semakin besar benda uji, semakin rendah kuat tekan terukur, ini disebabkan karena pada benda uji yang besar, relatif ketidak-sempurnaan benda uji akan semakin tinggi. Contoh dari ketidak-sempurnaan ini adalah adanya rongga karena tidak sempurnanya pemadatan, segregasi (turunnya agregat kasar ke dasar cetakan) dan *bleeding* pada permukaan. Peristiwa *bleeding* akan dibahas di bab berikut. Semua faktor tersebut akan berpengaruh pada kepadatan benda uji, dan selanjutnya akan mengakibatkan besarnya energi yang dapat diserap menjadi bervariasi. Tabel 3.1 menunjukkan perbandingan kekuatan berbagai benda uji terhadap kubus 150 x 150 x 150 mm (*sumber: PBI 1971, Van der Schrier, 1975*).

Tabel 3.1. Perbandingan Kuat Tekan Berbagai Benda Uji

Benda Uji	Perbandingan Kekuatan Tekan
Kubus 150x150x150 mm	1.00
Kubus 100x100x100 mm	1.03
Kubus 200x200x200 mm	0.95
Kubus 300x300x300 mm	0.76
Silinder 150x300 mm	0.83

3.2.3 Perilaku Tegangan-Regangan dan Modulus Elastisitas Bahan

Bila pada saat sebuah benda diberikan gaya, maka akan terjadi dua fenomena, tegangan dan regangan. Tegangan didefinisikan sebagai besar-nya gaya per-satu-satuan luas, sedangkan regangan adalah perbandingan perubahan penjang terhadap panjang semula. (Gambar 3.10).



Gambar 3.10. Perilaku Tegangan-Regangan

Tegangan = $f_c = \sigma_c = K = \frac{gaya}{satuan\ luas}$ (MPa atau kg/cm^2)

$$f_c = K = \frac{P}{A}$$

Regangan = $\varepsilon_c = \frac{perubahan\ panjang}{panjang\ semula}$

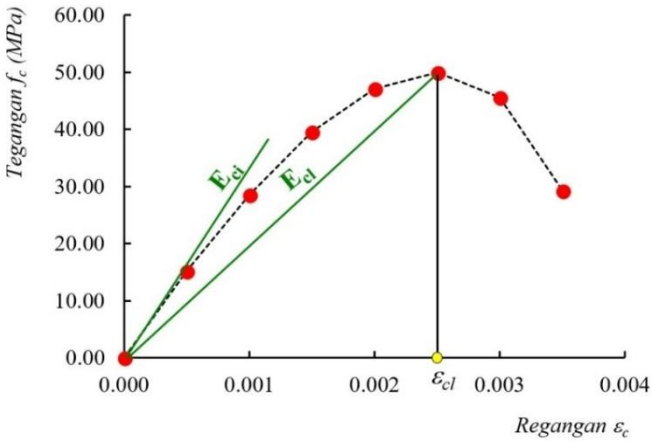
$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L}$$

Apabila beban P ditingkatkan secara bertahap, maka peningkatan beban dapat diukur untuk setiap tahapan inkrementasi. Deformasi yang diakibatkan oleh setiap tahapan beban juga dapat di catat. Bila seluruh data direkam maka akan di dapatkan hasil sebagai berikut (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Hasil Uji Tekan Silinder 150x300 mm

Load P (kN)	Deformation ΔL (mm)	Stress $f_c = \frac{P}{A}$ (MPa)	Strain $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}(^0/_{00})$
0	0.00	0.00	0.000
268	0.15	15.18	0.001
505	0.30	28.56	0.001
699	0.45	39.53	0.002
834	0.60	47.17	0.002
884	0.75	49.99	0.003
805	0.90	45.53	0.003
517	1.05	29.23	0.004

Hubungan tegangan dan regangan suatu bahan dapat digambarkan dalam sistem salib sumbu, di mana regangan merupakan absis, dan tegangan merupakan ordinatnya. Hubungan tegangan dan regangan bahan lazim disebut *stress-strain relationship*, dan menggambarkan perilaku sebuah bahan akibat tegangan yang meningkat secara bertahap. Untuk beton, perilaku tegangan-regangan untuk kuat tekan 50 MPa dapat dilihat dalam Gambar 3.11. Perilaku tegangan-regangan beton mula-mula linier, sampai sekitar 40% dari tegangan batas, kemudian menjadi non-linier sampai runtuh.



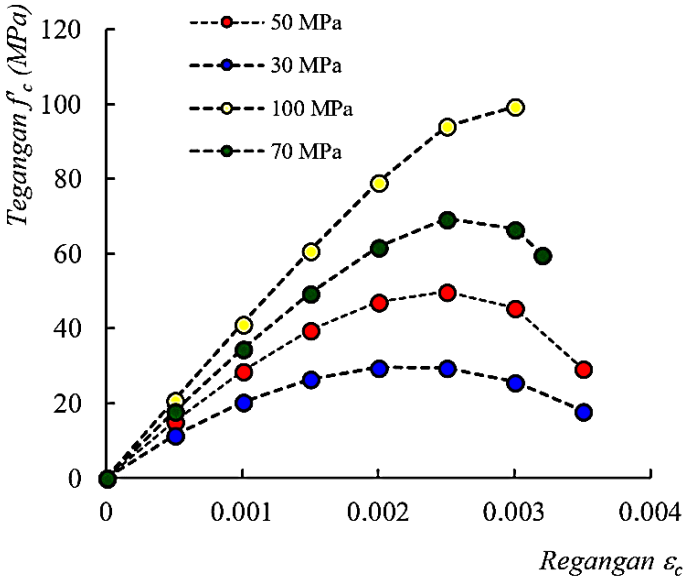
Gambar 3.11. Diagram Tegangan-Regangan Beton f'c = 50 MPa

Bahan beton tampak mempunyai perilaku paska-puncak *(post peak behavior)*, ini menandakan material masih menyimpan energi setelah runtuh. Dari penelitian ditemukan bahwa semua beton nomal akan mengalami keruntuhan pada regangan sekitar 0.003 adapun bentuk kurva tegangan-regangan identik, untuk semua mutu beton. Setiap material akan mempunyai perilaku tegangan-regangan yang berbeda (Gambar 3. 12).

Modulus elastisitas suatu bahan adalah perbandingan antara tegangan dan regangan bahan dan ditulis sebagai:

Modulus Elastis = $\frac{tegangan}{regangan}$ dalam MPa

$$E = \frac{f}{\varepsilon} \tag{3.9}$$



Gambar 3.12. Diagram Tegangan-Regangan Beberapa Mutu Beton

Apabila hubungan tegangan-regangan berupa garis lurus, maka nilai modulus elastisitas E akan selalu sama (tetap), sehingga berlaku hukum Hooke (*Robert Hooke, 1635-1703*). Untuk perilaku in-elastis maka dapat digunakan pendekatan. Ada beberapa pendekatan yang diusulkan oleh ACI (*American Concrete Institute*, http://www.concrete.org).

Code *fib*-CEB 2010 telah merumuskan hubungan tegangan-regangan bahan beton sebagai fungsi kuat tekan batas (f'_c) sebagai berikut:

$$f_c = \frac{k.\eta - \eta^2}{1+(k-2).\eta} . f_c' \qquad (3.10)$$

Dimana:

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}$$

$$k = \frac{E_{ci}}{E_{cl}}$$

ε_{cl} adalah regangan pada tegangan puncak

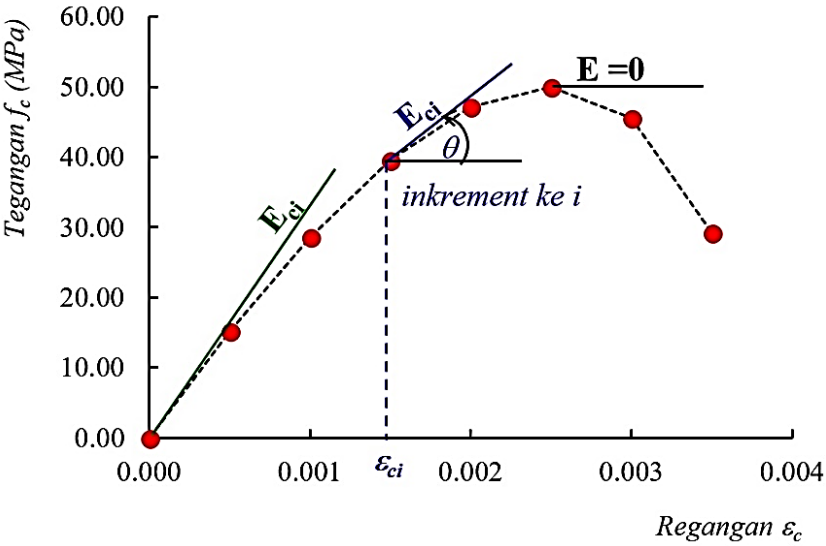
Modulus Elastisitas Tangensial (*Tangent Modulus*)

Tangent modulus merupakan garis singgung pada suatu tingkat beban yang ditinjau, dan diperoleh dari penurunan pertama (diferensial pertama) dari kurva tegangan-regangan (Gambar 3.13). Modulus elastisitas menunjukan kekakuan bahan, atau kekuatan bahan yang masih tersimpan.

$$E_c = \tan\theta = \frac{df_c}{d\varepsilon_c}$$

Untuk menentukan modulus elastis awal (*initial*) maka $E_{ci} = \frac{df_c}{d\varepsilon_c}$ dihitung untuk nilai $\varepsilon_c = 0$. Apabila modulus elastis bahan akan ditentukan pada tahapan beban yang lain, maka nilai regangan pada kondisi ini harus disubstitusikan dalam rumus 3.11. Tampak bahwa pada kondisi tegangan puncak nilai *E = 0*. Salah satu ciri bahwa bahan telah mencapai kekuatan maksimalnya adalah hilangnya kekakuan bahan.

Bahan beton mempunyai sifat non-linier, dan modulus elastis akan menurun, seiring meningkatnya tegangan.



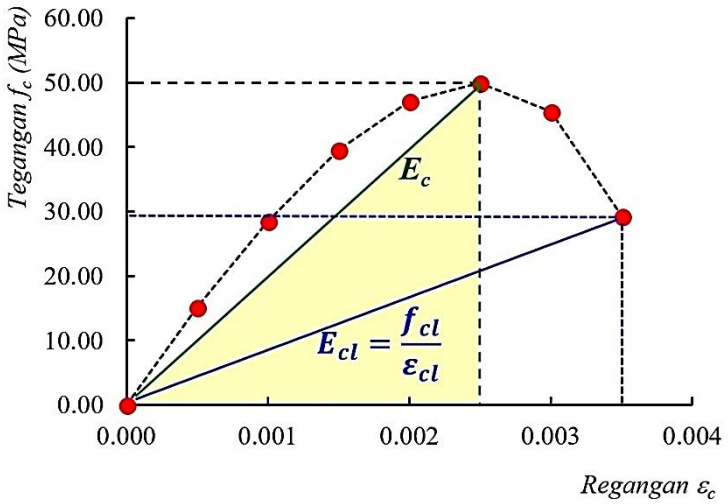
Gambar 3.13. Penentuan Modulus Elastis Tangensial

Modulus Elastisitas Sekan (*Secant Modulus*)

Secant modulus ditentukan berdasarkan besaran tegangan dan regangan sesaat, pada kondisi yang ditinjau (Gambar 3.14). *Secant modulus* selalu akan memberikan nilai lebih tinggi dari *tangent modulus*, juga pada saat keruntuhan bahan, nilai *secant modulus* tidak akan sama dengan nol (Gambar 3.14).

$$E_c = \frac{f_c}{\varepsilon_c}$$

Bila pada pendekatan tangent modulus pasca beban puncak akan diperoleh nilai E yang negatif, *secant modulus* akan selalu memberikan harga positif, juga waktu kurva tegangan-regangan menurun.



Gambar 3.14. Penentuan Modulus Elastis Sekan

Standard BS-EN (*British Standard - European Code*) dan *fib*-CEB menentukan modulus elastisitas awal beton sebagai fungsi kuat tekan batas f'_c. Nilai modulus elastisitas awal juga dikenal dengan modulus elastisitas Young *(Young's modulus).*

$$E_{ci} = E_{c0}\alpha_E \left(\frac{f'_c}{10}\right)$$

Dimana:

α_E adalah koefisien yang tergantung jenis agregat

f'_c adalah kuat tekan batas beton dalam MPa

$E_{c0} = 20.5\ 10^3$ MPa

Standard ACI 318 menentukan modulus elastisitas sekan beton sebagai fungsi kuat tekan batas f'_c dan massa jenis beton. Sekan modulus ini terukur pada 45% dari tegangan batas (*ultimate strength*).

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

Dimana:

w_c massa jenis beton dalam kg/m^3

f'_c adalah kuat tekan batas beton silinder 150 x 300 dalam MPa

3.3 RANGKUMAN

- Kuat tekan beton bisa diketahui dengan pengujian sampel silinder atau kubus.
- Benda uji silinder dan kubus yang tidak berukuran 15x15x15 cm harus dikonversikan berdasarkan Tabel 3.1 untuk mendapatkan kuat tekan beton dalam satuan kg/cm^2.
- Pendekatan modulus elastisitas sekan lebih banyak digunakan dalam praktek karena lebih mudah, dan cukup teliti.

BAB 4
PENGARUH AGREGAT, MORTAR DAN INTERFASA

Tujuan Umum:

1. Mahasiswa mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan, dan metode untuk meningkatkan kuat tekan.

Tujuan Khusus:

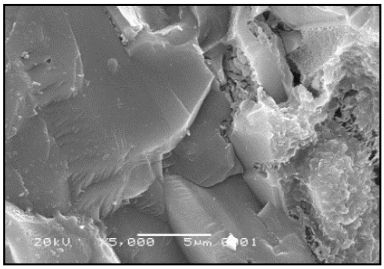
1. Mahasiswa mengetahui waktu ikat awal dan akhir semen.
2. Mahasiswa mengetahui sifat fisik agregat halus dan kasar yang baik.
3. Mahasiswa mengetahui tentang interfasa serta pengaruhnya pada kuat tekan beton.

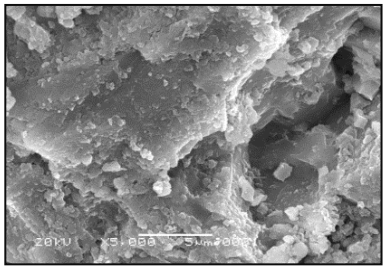
4.1 AGREGAT

Agregat akan mengisi 70-80% dari seluruh volume beton, sehingga sifat agregat akan sangat mempengaruhi kekuatan beton yang diperoleh. Salah satu sifat agregat yang akan yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah kekuatan agregat itu sendiri. Faktor kekuatan agregat terutama berpengaruh pada beton mutu tinggi. Namun untuk beton biasa dan beton mutu rendah kecuali kekuatan agregat, susunan agregat (*gradasi*) didalam campuran akan berpengaruh pula.

Agregat harus keras dan kuat, bersih dari kotoran dan lumpur serta stabil secara kimiawi. Artinya agregat tersebut tidak akan beraksi dengan salah satu komponen semen maupun air, dan tidak berubah wujud sebagai fungsi waktu. Agregat yang lunak mudah pecah, bahkan selama proses pengadukan, dan selanjutnya menyebabkan terjadi retak mikro waktu beton menerima tegangan. Sifat-sifat agregat yang mempengaruhi mutu beton adalah:

- Bentuk dan kekerasan permukaan (Gambar 4.1).
- Gradasi agregat dalam campuran (Gambar 4.2).
- Kandungan air.
- *Specific gravity* dan massa jenis.
- Porositas agregat (Gambar 19).

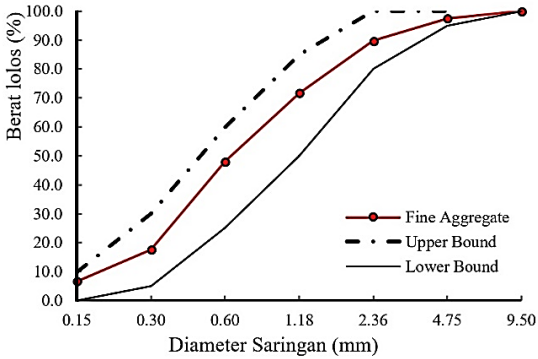




Kerikil laut Kerikil Pudak Payung

Gambar 4.1. Permukaan Agregat pada Perbesaran 5000 X

Tampak bahwa kekasaran permukaan agregat Pudak Payung, jauh lebih tinggi bila dibandingkan kerikil laut. Permukaan kasar akan memberikan luasan bidang kontak yang lebih besar, dan menghasilkan ikatan lebih baik dengan mortar.

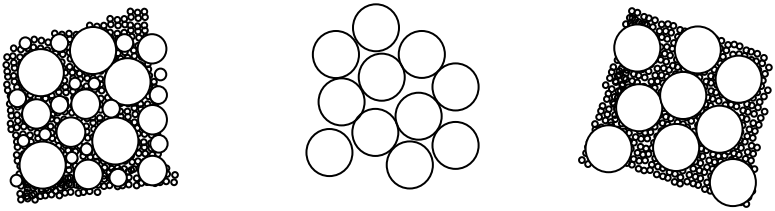


Gambar 4.2. Gradasi Pasir

Gradasi agregat yang baik akan mengakibatkan seluruh rongga beton terisi, sehingga kadar pori beton menjadi rendah. Ada tiga jenis gradasi:

- Gradasi baik (*well-graded*) merupakan campuran agregat yang terdiri dari bermacam ukuran sehingga dihasilkan susunan yang padat dan saling mengisi (Gambar 4.3.a).
- Gradasi buruk (*poor-graded*) ditandai oleh hanya adanya satu ukuran agregat dalam campuran. Gradasi sejenis ini akan mengakibatkan banyak rongga didalam beton (Gambar 4.3.b).

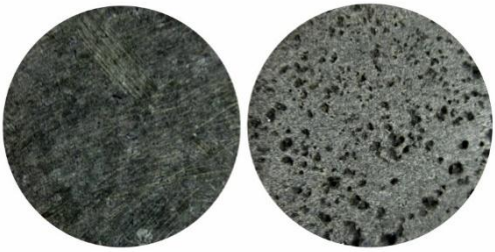
- Gradasi gap (*gap-graded*) merupakan campuran agregat yang hanya terdiri dari dua jenis ukuran yang berbeda jauh dalam ukuran. Gradasi serupa ini akan menimbulkan konsentrasi tegangan pada bidang pertemuan antara agreagat halus dan kasar (Gambar 4.3.c).



a. Well-graded b. Poor-graded c. Gap-graded

Gambar 4.3. Pengaruh Gradasi pada Kepadatan

Porositas agregat sangat mempengaruhi kuat tekan, karena agregat dengan porositas tinggi akan menghasilkan beton yang kurang padat (Gambar 4.4).



Pudak Payung Batu lava

Gambar 4.4. Pengaruh Porositas Agregat

4.2 SEMEN DAN MORTAR

Mortar berfungsi sebagai media perekat sekaligus pengisi rongga antar agregat kasar. Kekuatan pasta semen (*matrix* semen) dipengaruhi antara lain:

- ***Faktor air semen (FAS) atau Water-Cement-Factor (WCF atau w/c ratio)***

  FAS atau *WCF* merupakan perbandingan berat air yang digunakan dalam adukan terhadap berat semen.

$$FAS = \frac{berat\ air}{berat\ semen}$$

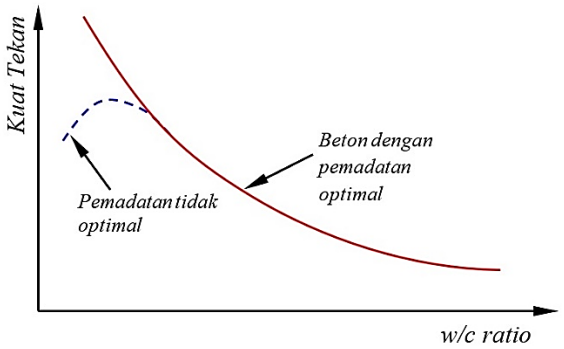
Air di dalam adukan beton mempunyai dua fungsi. Pertama sebagai komponen reagen terhadap reaksi kimia yang disebut hidrasi semen, dan kedua sebagai komponen kelacakan adukan. Kelacakan adalah nilai kekentalan adukan, semakin rendah FAS, makin rendah pula kelacakan adukan karena adukan semakin kental. Kelacakan rendah mengakibatkan sulitnya pencampuran dan pemadatan. Sebaliknya semakin tinggi FAS, semakin banyak air bebas dalam beton, air bebas adalah air yang tidak digunakan dalam proses hidrasi. Sebagai contoh, kita lihat reaksi komponen aluminat dalam semen:

$$C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_4$$
1 1.21 1.69

Dimana:

C_3A adalah *Tricalcium Aluminat* $(3C_aO.Al_2.O_3)$
H adalah air (H_2O)

Jumlah gram-molekul air yang dibutuhkan untuk melengkapi reaksi satu gram-molekul *tricalcium aluminat* adalah 1.21. Jumlah air yang tepat sehingga seluruh molekul semen dapat bereaksi dengan sempurna, disebut *konsistensi normal* semen. Apabila air yang tersedia lebih sedikit, maka tidak semua komponen semen dapat bereaksi, dan proses hidrasi menjadi tidak sempurna. Sebaliknya, kelebihan air akan mengakibatkan terjadinya air bebas dalam adukan. Setelah terjadi penguapan, air ini meninggalkan rongga dalam beton. Kurva berikut menunjukkan penurunan kuat tekan beton, sebagai fungsi peningkatan FAS (Gambar 4.5).



Gambar 4.5. Pengaruh WCF pada Kuat Tekan

Additive seperti *superplasticizer* dapat mengurangi tegangan geser permukaan selama pengadukan sehingga pengunaan *additive* ini bisa menekan kebutuhan air, dengan tetap memberikan kemudahan terhadap pengadukan. FAS yang rendah akan menghasilkan beton yang lebih padat dengan kadar pori yang lebih sedikit.

- ***Waktu Ikat Semen dan Beton***

Waktu ikat semen juga mempengaruhi kuat tekan beton terukur. Beton dianggap sudah mencapai kekuatan penuh pada usia 28 hari. Waktu ikat semen ditentukan dengan percobaan jarum *Vicat (Joseph Vicat, 1821-1902)*. Dasar alat ini adalah pengukuran tegangan permukaan *(surface stress)* yang terjadi waktu semen mengalami hidrasi (Gambar 4.6). Pada saat awal, adukan akan sangat cair, sehingga tegangan permukaan rendah. Bila semen mulai mengeras, maka tegangan permukaan akan meningkat, sehingga akhirnya semen membatu. Alat *Vicat* dilengkapi dengan dua buah jarum, masing masing berdiameter 10 mm untuk penentuan konsitensi normal, dan jarum 1 mm untuk penentuan waktu ikat awal.

Jarum 10 mm Jarum 1 mm

Gambar 4.6. Alat Vicat

Konsistensi normal ditentukan pada penurunan jarum 10 mm. Metode yang digunakan adalah metode coba-coba (*trial and error*). Semen diuji dengan beberapa variasi kadar air, dan hasilnya digambarkan dalam sistem salib sumbu dimana prosentase air merupakan absis, dan penurunan jarum merupakan ordinat (Tabel 4.1 dan Gambar 4.7).

Dari pengamatan grafik (Gambar 4.7) maka konsistensi normal semen OPC adalah sekitar 28.8%. Cara yang lebih akurat untuk menentukan suatu fungsi dari kumpulan data adalah menggambarkan *trendline*. Dari penggambaran *trendline* diperoleh fungsi hubungan penurunan jarum terhadap prosentase kadar air sebagai berikut:

$$y = 0.52\,x^2 - 26.1\,x + 332$$

Dimana:

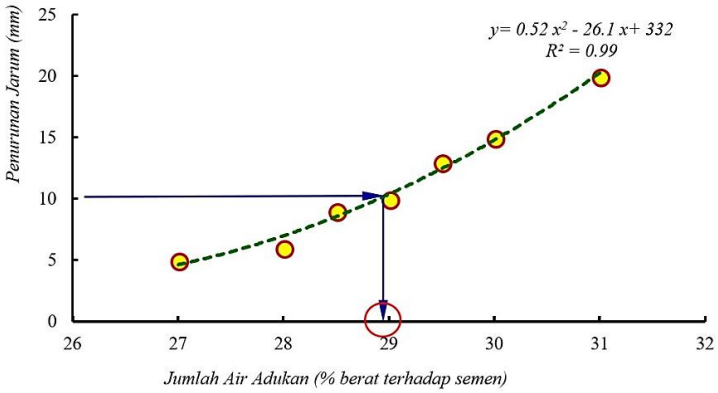
y adalah penurunan jarum dalam mm

x adalah kadar air dalam %

Dengan mensubstitusi nilai y = 10 didapatkan harga x = 28.91 %

Tabel 4.1. Data Konsistensi Normal Semen OPC

Data	Berat Semen (gram)	Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Keterangan
1	300	27.0	5	
2	300	28.0	6	
3	300	28.5	9	
4	300	29.0	10	Semen Gresik Tipe OPC
5	300	29.5	13	
6	300	30.0	15	
7	300	31.0	20	



Gambar 4.7. Penentuan Konsistensi Normal

Waktu ikat semen ditentukan berdasarkan penurunan 25 mm dengan jarum 1mm. Kadar air semen ditentukan berdasarkan konsistensi normal, kemudian waktu ikat dicari dengan metode coba-coba. Jarum dilepas berkali-kali, sehingga akhirnya dapat dilukiskan hubungan waktu (dalam menit) dengan penurunan jarum dalam mm. Waktu digambarkan sebagai absis, dan penurunan jarum sebagai ordinat (Tabel 4.2 dan Gambar 4.8).

Tabel 4.2. Data Waktu Ikat

Waktu Pencatatan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
0	40
15	40
30	40
45	40
60	39
75	35
90	32
105	29
120	25
135	22

Dari pengamatan grafik maka waktu ikat semen OPC adalah sekitar 122 menit. Dari penggambaran *trendline* diperoleh fungsi hubungan penurunan jarum terhadap waktu sebagai berikut:

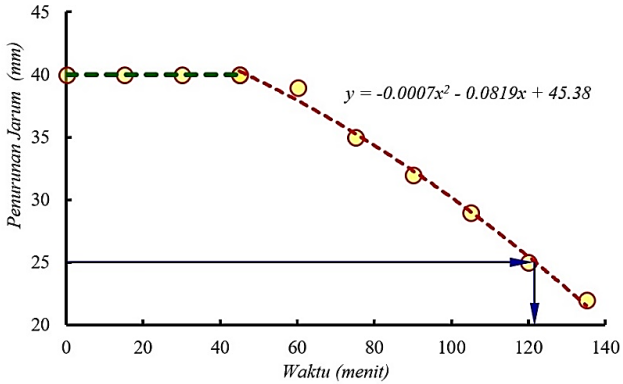
$$y = -0.0007\,x^2 - 0.082\,x + 45.4$$

Dimana:

y adalah penurunan jarum dalam mm

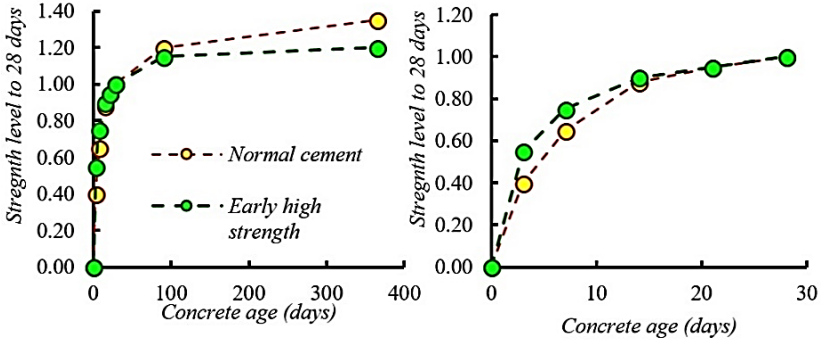
x adalah waktu dalam menit

Dengan mensubstitusi nilai y = 25 didapatkan harga x = 121.88 menit



Gambar 4.8. Penentuan Waktu Ikat Awal

Tampak dengan bertambahnya waktu hidrasi, semen akan semakin mengeras. Dengan demikian kuat tekan beton sangat tergantung pada usia beton saat pengujian. Kecuali usia, kekuatan beton juga tergantung jenis semen yang digunakan (Gambar 4.9).



Gambar 4.9. Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Usia

- ***Tingkat Hidrasi Semen***

Apabila karena suatu sebab, semen tidak seluruhnya dapat bereaksi, maka kekuatan beton juga akan menurun. Tidak sempurnanya proses hidrasi semen bisa berasal dari faktor seperti: kurangnya FAS, kesalahan

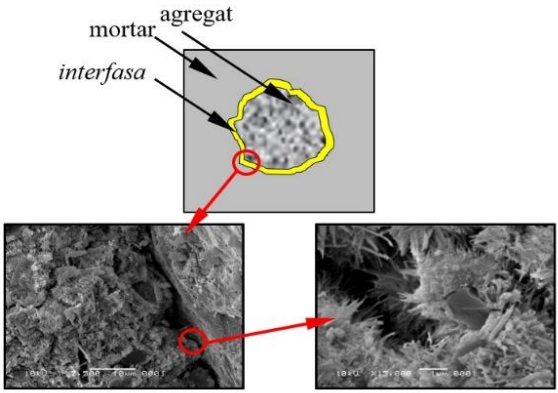
pengadukan, atau kualitas semen yang kurang bagus. Penelitian membuktikan semen dengan partikel lebih halus (*nano*) akan lebih mudah berhidrasi.

- ***Kadar Udara***

Kadar udara selama pengadukan meninggalkan rongga (*void*) dalam beton. Pemadatan yang baik dan efisien akan membantu menurunkan kadar pori udara yang terjebak.

4.3 INTERFASA (*INTERFACE*)

Daerah terlemah dalam beton adalah daerah interfasa antara agregat kasar dan pasta semen. Daerah ini akan mempunyai susunan kristal yang berbeda dengan *matrix* semen yang terletak lebih jauh dari permukaan agregat. Susunan kristal ini cenderung menghasilkan banyak rongga dan lebih lemah karena terdapat kristal-kristal besar yang mempermudah menjalarnya retakan dalam *matrix* semen. Interfasa ini mempunyai ketebalan $30\mu m - 50\mu m$, tetapi akan menjadi tempat terjadinya awal retak mikro dalam beton (Gambar 4.10).

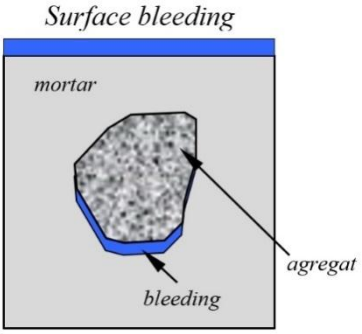


Gambar 4.10. Interfasa di Sekitar Agregat Kasar

Kondisi interfasa sendiri dipengaruhi beberapa faktor:

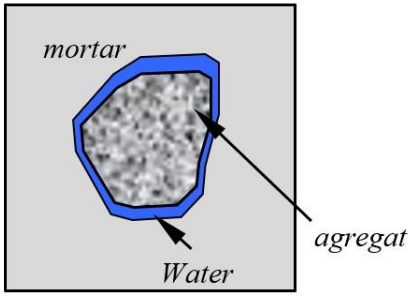
- *Sifat permukaan agregat*; kekasaran, kelembaman dan sifat kimiawi material.
- *Bleeding*; pada saat beton dipadatkan, maka air semen akan cenderung naik ke permukaan. Semakin tinggi *w/c* rasio, semakin banyak air

yang mengenang dipermukaan beton. Peristiwa ini disebut *surface bleeding*. Air semen yang berada di *bawah* agregat terhalang gerakannya menuju permukaan, dan membentuk kantong-kantong air dalam interfasa di bawah agregat (Gambar 4.11). Selain meninggalkan rongga setelah penguapan, kadar air tinggi dan rongga bebas di interfasa akan mengakibatkan terbentuknya kristal-kristal besar dan panjang di dalam interfasa.



Gambar 4.11. Surface Bleeding dan Bleeding dalam Interfasa

- *Water film*; setiap agregat mempunyai derajat absorbsi. Absorbsi adalah tingkat penyerapan air dari agregat tersebut. Agregat dengan nilai absorbsi tinggi menyerap banyak air, baik waktu sebelum pengadukan, maupun selama proses pengadukan. Agar *w/c* tetap mencukupi kebutuhan hidrasi, faktor absorbsi harus diperhitungkan dalam analisa campuran. Setelah beton dituang, maka lambat laun air yang terserap oleh agregat akan keluar, dan membentuk sebuah film air (*water film*) mengelilingi agregat. *Water film* memperlemah interfasa (Gambar 4.12).



Gambar 4.12. Water Film dalam Interfasa

- Adanya reaksi kimia antara agregat dengan semen.
- Kotornya pada permukaan agregat, sehingga lekatan mortar dengan agregat berkurang. Kotoran bisa berupa lumpur maupun zat organis. Dalam pedoman beton, jumlah kadungan lumpur dan zat organis sangat dibatasi karena merupakan salah satu sebab utama menurunnya mutu beton.

4.4 RANGKUMAN

1. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh faktor air semen. Semakin tinggi faktor air semen, semakin rendah kuat tekan beton. Semakin rendah faktor air semen, kuat tekan beton semakin tinggi.
2. Interfasa antara pasta semen dan agregat kasar merupakan zona yang paling rapuh ikatannya, sehingga keruntuhan beton akibat tekan umumnya terjadi pada zona ini.

4.5 LATIHAN

1. Jelaskan waktu ikat awal semen!
2. Jelaskan waktu ikat akhir semen!
3. Jelaskan pengaruh FAS terhadap kuat tekan beton!
4. Jelaskan apa yang dimaksud *Bleeding*!

BAB 5
KEKUATAN TARIK BETON

Tujuan Umum:

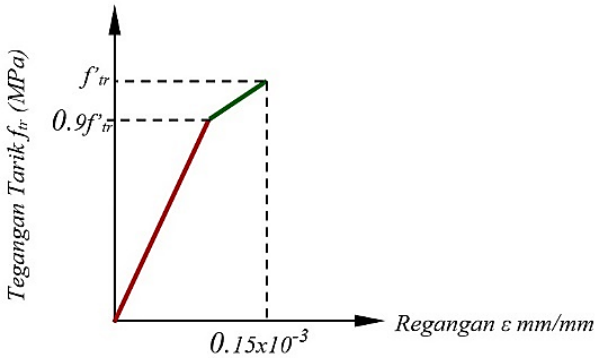
1. Mahasiswa mengetahui perilaku kekuatan tarik beton.

Tujuan Khusus:

1. Mahasiswa mengetahui beberapa metode cara menguji kuat tarik beton.
2. Mahasiswa memahami perilaku kuat tarik beton serta dampaknya pada struktur.

5.1 KUAT TARIK

Karena bahan beton merupakan komposit agregat yang diikat oleh media *matrix* semen, kuat tarik beton rendah, bila dibandingkan kuat tekannya. Kuat tarik beton umunya hanya mencapai 10% - 15% dari kuat tekan beton. Standar *fib*-CEB 2010 menggambarkan hubungan tegangan-regangan tarik beton sebagai sebuah fungsi *bi-linier* (Gambar 5.1). Apabila beton tertekan dapat mencapai regangan 0.003 pada saat runtuh, regangan tarik beton hanya mencapai 0.00015. Rumusan perilaku tegangan-regangan terlihat dalam rumus 5.1 dan 5.2.



Gambar 5.1. Perilaku Tegangan-Regangan Tarik

$$f_{tr} = E_{ci}.\varepsilon_{ct} \text{ untuk } f_{tr} \leq 0.9f'_{tr} \quad (5.1)$$

$$f_{tr} = f'_{tr}\left[1 - 0.1.\frac{0.00015-\varepsilon_{ct}}{0.00015-0.9.{}^{f'_{tr}}/_{E_{ci}}}\right] \text{ untuk } f_{tr} > 0.9f'_{tr} \quad (5.2)$$

Dimana:

E_{ci} adalah modulus elastisias tangen dari rumus (3.13)

f'_{tr} adalah kuat tarik batas beton dalam MPa

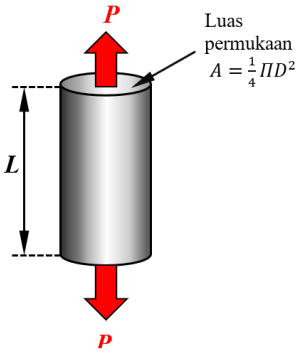
Pengujian tarik beton secara teknis tidak semudah pegujian kuat tekan, karena kesulitan pencengkraman benda uji. Pengujian tarik beton dibedakan menjadi *pengujian tarik langsung* dan *pengujian tarik tidak langsung*. Pengujian tarik tidak langsung menggunakan pendekatan yang berbeda dengan uji tarik langsung.

5.2 UJI TARIK LANGSUNG

Seperti pada pengujian tekan, pada benda uji diberikan gaya tarik P sehingga terjadi tegangan tarik dan regangan tarik. Perumusan tegangan dan regangan tidak berbeda dengan perilaku tekan (Gambar 5.2).

Tegangan = $f_{tr} = \sigma_{tr} = K = \frac{gaya}{satuan\ luas}$ dalam MPa atau kg/cm^2 (5.3)

Regangan = $\varepsilon_{tr} = \frac{perubahan\ panjang}{panjang\ semula}$ (5.4)



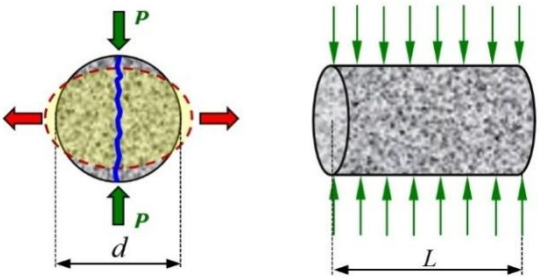
Gambar 5.2. Uji Tarik Langsung Beton

5.3 UJI TARIK TIDAK LANGSUNG

Uji tarik tidak langsung dilaksanakan dengan menciptakan tegangan tarik tidak langsung melalui media lain. Ada dua macam uji tarik tidak langsung, uji belah silinder (*Brazilian splitting test*) dan uji lentur.

5.3.1. Uji Belah (*Brazillian Splitting*)

Uji belah didasarkan pada perilaku tekan benda uji dan *Poisson rasio*. Apabila sebuah benda ditekan, maka akibat adanya adanya hukum kekekalan massa dan *Poisson rasio*, terjadi regangan tarik kearah tegak lurus gaya. Regangan tarik ini menimbulkan tegangan tarik, dan apabila beban ditingkatkan sampai benda uji terbelah, tegangan tarik batas (*ultimate tensile stress*) dapat dihitung (Gambar 5.3 dan 5.4).



Gambar 5.3. Uji Belah

Kuat tarik beton dapat dihitung dengan rumus:

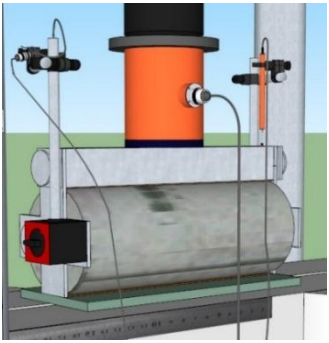
$$f'_{tr} = \frac{2P}{\pi L d} \tag{5.5}$$

Dimana:

L adalah panjang silinder (mm)

d adalah ~~kuat~~ diameter silinder (mm)

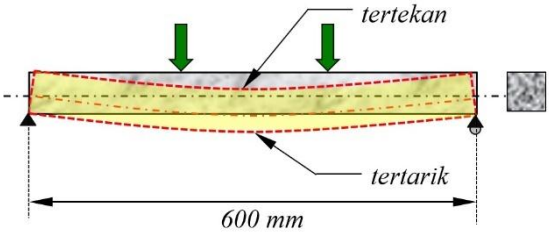
Penelitian menunjukkan bahwa kuat tarik dengan uji belah akan memberikan nilai $f'_{tr} = 0{,}5\sqrt{f'_c}$ terhadap kuat tekan beton.



Gambar 5.4. Uji Belah, Pengukuran Beban dan Deformasi

5.3.2. Uji lentur (flexure test)

Uji lentur didasarkan pada perilaku momen benda uji. Apabila sebuah benda menderita momen, maka akan terjadi deformasi lentur dimana sebagian serat tertarik, dan sebagian tertekan. Tegangan tarik yang terjadi dapat dihitung dengan mekanika sederhana sebagai fungsi dari beban yang bekerja (Gambar 5.5). Metode yang digunakan SNI dan ASTM adalah menggunakan balok berukuran 150 x 150 x 600 mm yang diberi beban terpusat sebanyak dua buah.



Gambar 5.5. Uji Tarik Lentur

Kuat tarik beton dapat dihitung dengan rumus:

$$f_{MR} = \frac{PL}{bd^2} \tag{5.6}$$

Dimana:
L adalah panjang balok (mm)
b dan *d* adalah lebar dan tinggi penampang

Tegangan tarik yang diperoleh dari pengujian lentur disebut juga *Modulus of Rupture* (f_{MR}). Dari hasil penelitian didapatkan bahwa $f_{MR} = 0{,}6\sqrt{f'_c}$ terhadap kuat tekan beton.

5.4 RANGKUMAN

1. Kuat tarik beton bisa diperoleh dengan melakukan uji tarik langsung atau tak langsung.
2. Kuat tarik beton jauh lebih rendah dari pada kuat tekannya.

BAB 6
BETON SEGAR DAN BETON KERAS

Tujuan Umum:

1. Mahasiswa mengetahui sifat-sifat beton segar dan keras.

Tujuan Khusus:

1. Mahasiswa mengetahui *workability* beton konvensional dan *self compacting concrete* yang baik.
2. Mahasiswa mengetahui dua jenis beton yaitu beton bertulang dan beton prategang.
3. Mahasiswa mengatahui pengaruh susut dan rangkak pada beton.

6.1 BETON SEGAR

Properti beton segar penting karena akan mempengaruhi sifat beton kemudian. Ditinjau dari sudut pengaruh beton segarmaka ada dua kriteria utama:

1. Kriteria jangka pendek. Kondisi ini menggambarkan keadaan adukan beton yang masih bersifat plastis atau dikenal dengan sifat kelacakan (*workability*). Kekuatan beton dalam keadaan ini tidak ditinjau, hanya kelacakan yang termonitor. Kelacakan beton dapat memberikan gambaran tentang kualitas beton yang diperoleh.
2. Kriteria jangka panjang, waktu adukan beton mulai mengeras. Dalam kondisi telah mengeras kekuatan (*strength*), keawetan (*durability*) dan stabilitas volume yang menjadi kriteria penilaian utama.

6.2 KRITERIA JANGKA PENDEK

Ada beberapa faktor penting yang harus diperhatikan pada beton segar. Faktor-faktor utama adukan basah yang sangat mempengaruhi kondisi beton adalah:

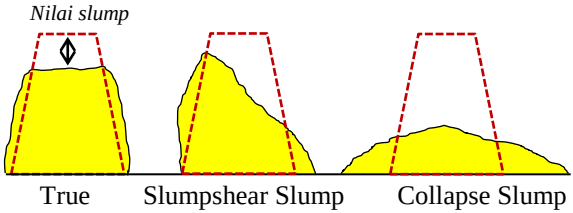
- Mudah diaduk, dicampur dan ditransportasikan.
- Mempunyai kualitas dan campuran yang seragam dan homogen untuk keseluruhan volume pekerjaan.
- Mempunyai kelacakan cukup agar dapat mengisi seluruh rongga cetakan dengan padat serta menghasilkan rongga udara dan air

seminimal mungkin.

- Proses pemadatan harus mudah dengan tidak membutuhkan energi yang besar.
- Tidak mengalami segregasi.
- Harus dapat dihaluskan dengan mudah.

Apabila tidak digunakan *additive*, maka kelacakan beton dapat digunakan sebagai tolok ukur jumlah air yang dipakai dalam adukan. Semakin tinggi nilai *w/c*, semakin mudah pengadukan, tetapi kuat tekan beton akan menurun drastis. Metode penentuan kelacakan di lapangan adalah menggunakan kerucut Abrams (*Duff A. Abrams, 1880-1965*). Pengujian ini juga disebut *slump-test*. Meskipun sederhana dan mudah digunakan, tingkat ketelitian metode uji ini sangat rendah, dan dengan adanya beragam *additive*, nilai *slump* bukan lagi dapat digunakan sebagai tolok ukur tingkat *w/c*.

Metoda uji *slump* adalah pengamatan terhadap perilaku deformasi adukan basah akibat gravitasi, semakin tinggi *w/c*, semakin encer adukan dan semakin besar deformasi yang terjadi setelah kerucut *Abrams* dipindahkan (Gambar 6.1).



Gambar 6.1. Perilaku Hasil Uji Slump

Komposisi campuran akan menghasilkan tiga kemungkinan pola keruntuhan. *True slump* memandakan komposisi campuran yang homongen dengan kekentalan yang cukup untuk dapat mempertahankan bentuk adukan setelah pengujian. *Shear slump* memandakan rendahnya kohesi, dan biasanya terjadi adukan yang tidak merata, atau menandakan adanya segregasi dalam adukan. *Collapse slump* menandakan adukan yang terlalu basah. Walaupun demikian, adanya *additive superplasticizer* dapat menghasilkan adukan dengan w/c sangat rendah, tapi nilai slump sangat

tinggi. Pada *SCC* (*self compacting concrete*) bahkan adukan dapat mengalir. Percobaan *slump* dengan demikian hanya dapat digunakan bila tidak digunakan *additive* (Gambar 6.2).

Gambar 6.2. Kelacakan SCC

6.3 KRITERIA JANGKA PANJANG

Pada kriteria jangka panjang maka faktor seperti kekuatan, daktilitas, keawetan menjadi tinjauan. Kekuatan dinilai dari kuat tekan karakteristik beton, sedang untuk daktilitas, umumnya beton mengandalkan kerjasama dengan baja tulangan. Agar beton tetap awet maka perlu diperhatikan bahwa beton padat, serta tidak terjadi rongga-rongga di antara beton dan tulangan.

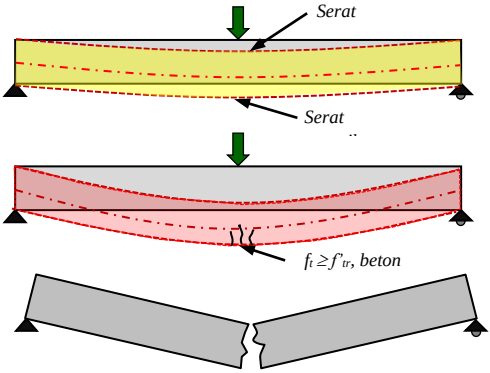
Aspek beton sebagai komponen komposit dengan tulangan baja, merupakan bidang studi tersendiri dan tercakup dalam mata kuliah beton bertulang.

6.4 PERKEMBANGAN BETON SEBAGAI ELEMEN STRUKTUR

Sejak zaman dahulu kala manusia telah mencari material pengikat batuan, karena menyadari kemudahan yang didapatkan apabila batuan dapat dilekatkan menjadi satu kesatuan. Bahan semen yang paling awal digunakan adalah tanah lempung. Material ini sudah digunakan di zaman kejayaan Firaun Mesir. Tahun 1796 *James Parker* di Inggris mengajukan *patent* atas temuannya berupa material pengikat berbasis kalsium yang di proses dari batu kapur. Proses serupa dikembangkan di Perancis oleh *Vicat* di tahun 1813. Baru pada tahun 1824 *Joseph Aspdin* seorang tukang batu di Leeds, Inggris menemukan *Portland Cement* (PC) yang sampai hari ini digunakan. Karena pada dasarnya beton merupakan bahan yang terbangun oleh agregat yang dilekatkan dengan semen, bahan ini sangat lemah terhadap tarik. Berikut adalah perjalanan konsep beton sampai saat ini.

6.4.1 Beton Biasa (*Plain Concrete*)

Perilaku beton biasa tampak pada Gambar 6.3. Akibat beban pada gelagar, gelagar mengalami deformasi lentur. Perilaku lentur ditandai dengan adanya serat tertarik dan serat tertekan, sehingga terjadi regangan tarik dan tekan. Pada gelagar tergambar, tarik terjadi di serat bawah, dan tekan di serat atas. Regangan selalu menimbulkan tegangan. Dengan demikian serat gelagar di atas garis netral menderita tegangan tekan, dan serat di bawah garis netral menderita tegangan tarik.



- Gelagar melentur, serat atas tertekan dan serat bawah tertarik.
- Kekuatan tarik beton terlampai, beton mengalami retak di daerah tarik.
- Retak menyebar kearah titik berat penampang, gelagar runtuh.

Gambar 6.3. Perilaku Beton

Misalkan gelagar terbuat dari beton dengan kuat tekan silinder sebesar $f'_c = 60\ MPa$, maka kuat tarik dapat dihitung dari hubungan kuat tarik dan tekan $f'_{tr} = 0{,}5\sqrt{f'_c}$. Dengan demikian kuat tarik beton adalah $f'_{tr} = 3.87\ MPa$.

Bila tegangan di serat bawah lebih rendah dari 3.87 MPa, maka gelagar masih dapat memikul beban. Tetapi bila beban ditingkatkan, tegangan juga akan bertambah besar. Pada saat $f_{bottom} = 3.87\ MPa$ maka serat terbawah mulai mengalami retak. Retaknya penampang mengakibatkan luasan penampang yang memikul beban berkurang, dan kekuatan gelagar akan menurun secara drastis. Tegangan di serat bawah makin meningkat, retak makin membesar, dan akhirnya gelagar runtuh.

Tampak bahwa walaupun kekuatan tekan beton tinggi, $f'_c = 60\ MPa$, gelagar akan runtuh pada saat serat tertarik mencapai $f'_{tr} = 3.87\ MPa$.

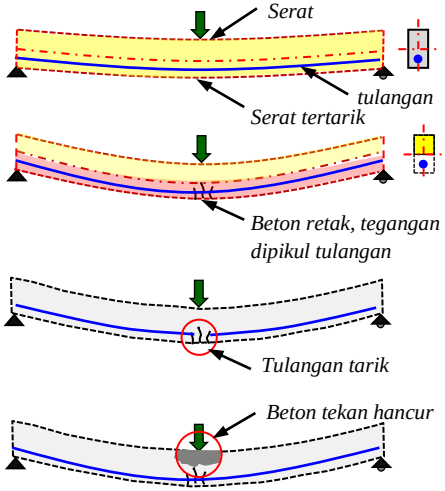
Sehingga kemampuan tekan beton yang sedemikian tinggi *tidak pernah* dapat termanfaatkan. Keadaan ini merupakan dasar pemikiran perkembangan beton biasa menjadi beton bertulang (*Reinforced Concrete-RC*).

6.4.2 Beton Bertulang (*Reinforced Concrete - RC*)

Agar kekuatan tekan beton dapat termanfaatkan, maka ditempatkan tulangan pada daerah tertarik. Pada saat beton tertarik mengalami keretakan, tegangan tarik yang sudah tidak dapat dipikul beton dilimpahkan pada tulangan. Proses pemindahan tegangan ini disebut juga *transfer tegangan* tarik. Transfer ini bisa terjadi bila terpenuhinya beberapa syarat:

- Material tulangan harus mempunyai kekuatan tarik yang tinggi.
- Harus ada lekatan (*bond*) yang kuat antara tulangan dan beton.
- Material tulangan harus *kompatibel* dengan beton, artinya, memiliki sifat regangan karena respon gaya dan perubahan suhu yang sama.

Material yang memenuhi kriteria tersebut adalah baja atau FRP (*fiber reinforced plastic*). Mekanisme keruntuhan gelagar beton bertulang adalah sebagai berikut (Gambar 6.4):

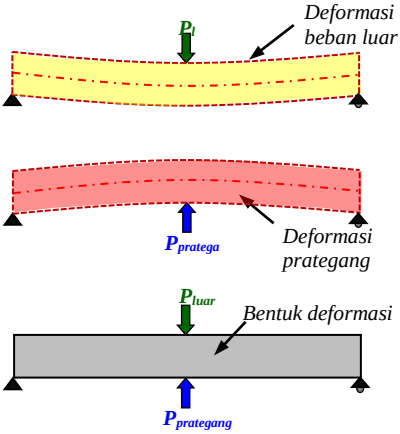


- Tulangan ditempatkan di daerah tertarik, bila $f_t < f'_{tr}$ penampang masih utuh, tulangan tidak bekerja.
- $f_t \geq f'_{tr}$, beton tertarik retak, tegangan dilimpahkan pada tulangan. Penampang beton disebut penampang retak *(cracked section).*
- Keruntuhan terjadi karena tulangan mencapai batas kekuatannya, beton tertekan masih bekerja.
- Keruntuhan terjadi karena beton tertekan hancur, tulangan masih bekerja.

Gambar 6.4. Perilaku Beton Bertulang

Dengan menggunakan beton bertulang, kuat tekan beton yang tinggi dapat termanfaatkan. Hanya sebagian penampang beton tertarik yang sudah retak tidak lagi berfungsi memikul beban. Dengan demikian timbul pemikiran untuk mengoptimasi perencanaan beton, dan lahirlah konsep beton prategang (*Prestressed Concrete – PC*).

6.4.3 Beton Prategang (*Prestressed Concrete - PC*)



- Prakiraan deformasi akibat beban luar P_{luar}.Serat atas tertekan, serat bawah tertarik.
- Sebelum beban P_{luar}bekerja, diberikan beban prategang $P_{prategang}$, yang menimbulkan deformasi berlawanan, tarik di atas dan tekan di bawah.
- Pada saat beban luar bekerja, terjadi kesetimbangan deformasi, dan gelagar dapat rata sempurna. Dengan demikian tidak terjadi tarik, dan penampang tidak akan retak.

Gambar 6.5. Perilaku Beton Prategang

Agar seluruh penampang beton bekerja memikul beban, penampang tidak boleh retak. Beton prategang mendasarkan perencanaan pada penampang utuh (*un-cracked section*). Penampang utuh didapatkan dengan memberikan perubahan bentuk (deformasi) yang berlawanan dengan deformasi yang akan terjadi akibat beban. Deformasi ini diberikan *sebelum beban luar bekerja* (Gambar 6.5).

6.5 SUSUT DAN RANGKAK

Setelah adukan beton dituang ke dalam cetakan, dipadatkan dan dihaluskan maka akan terjadi perubahan (deformasi) volumetrik pada beton yang dipengaruhi kelembaban, *temperature* dan pembebanan. Deformasi ini merupakan fungsi dari waktu dan dapat dibedakan menjadi:

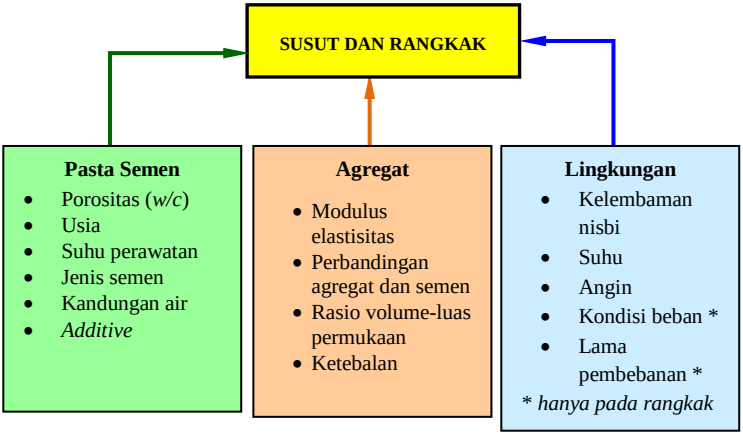
- Susut (*shrinkage*), peristiwa perubahan volume beton karena penguapan air.
- Rangkak (*creep*), peristiwa perubahan volume beton karena adanya tegangan karena beban yang terus menerus.

6.5.1 Susut (*Shrinkage*)

Gambar 6.6. Pemasangan Terpal Guna Mencegah Penguapan (PCI Handbook)

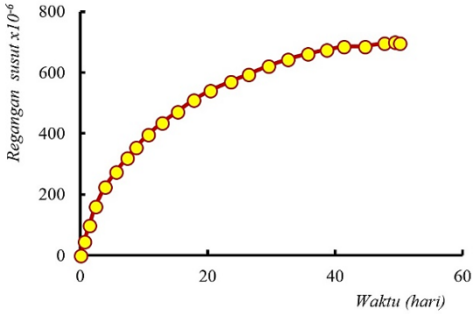
Susut dibedakan menjadi susut plastis (*plastic shrinkage*) dan susut pengeringan (*drying shrinkage*). Susut plastis adalah peristiwa penguapan air pada adukan yang belum mengeras. Apabila penguapan permukaan tidak dijaga, maka mengakibatkan retak-retak rambut pada permukaan beton, yang memperlemah beton setelah hidrasi semen selesai. Kecuali penguapan, susut plastis juga dapat terjadi karena penyerapan air oleh *bekisting*. Metode untuk memperkecil susut plastis adalah dengan menjaga kelembaman beton selama proses pengerasan. Pada benda uji hal ini dilakukan dengan perendaman, sedang di lapangan beton dibasahi secara terus menerus atau diupayakan agar penguapan yang terjadi sekecil mungkin (Gambar 6.6).

Susut pengeringan adalah peristiwa penguapan air pada beton yang telah mengeras. Faktor-faktor yang mempengaruhi susut pengeringan tergantung dari parameter material penyusun beton. Faktor yang mempengaruhi susut, juga berpengaruh pada rangkak (Gambar 6.7).



Gambar 6.7. Faktor Pengaruh Susut dan Rangkak

Susut akan meningkat sebagai fungsi waktu. Setelah 50 hari, susut mencapai kondisi stabil, artinya peningkatan regangan susut yang terjadi relatif kecil (Gambar 6.8).

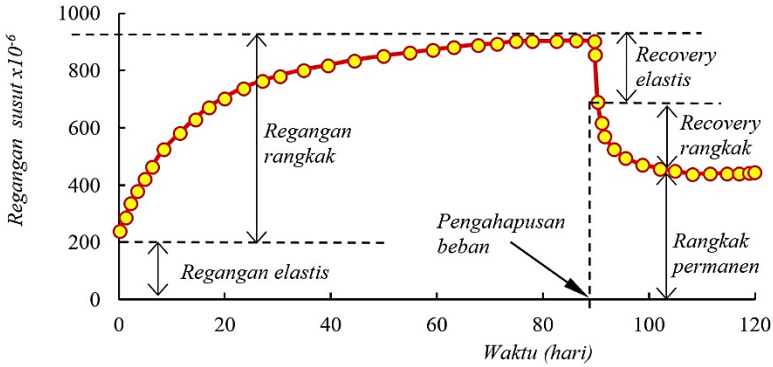


Gambar 6.8. Perilaku Susut Sebagai Fungsi Waktu

6.5.2 Rangkak (*Creep*)

Rangkak adalah peristiwa perubahan volume sebagai fungsi waktu, dan dipengaruhi adanya beban. Susut dan rangkak merupakan fenomena yang saling berhubungan karena memiliki berbagai kesamaan perilaku, juga faktor-faktor yang mempengaruhi susut dan rangkak sama. Kecuali itu, baik susut maupun rangkak bersifat tetap (permanen), dan bersumber pada perilaku pasta semen. Agregat dalam hal ini bersifat sebagai kekangan.

Perbedaan rangkak dan susut adalah bahwa rangkak akan terjadi apabila ada beban luar yang mengakibatkan tegangan pada beton. Apabila beban tersebut dihapuskan, maka sebagian dari regangan rangkak yang terjadi dapat hilang, tetapi ada sebagian pengaruh rangkak yang bersifat permanen. Gambar 6.9 menunjukkan perilaku rangkak pada bahan beton.

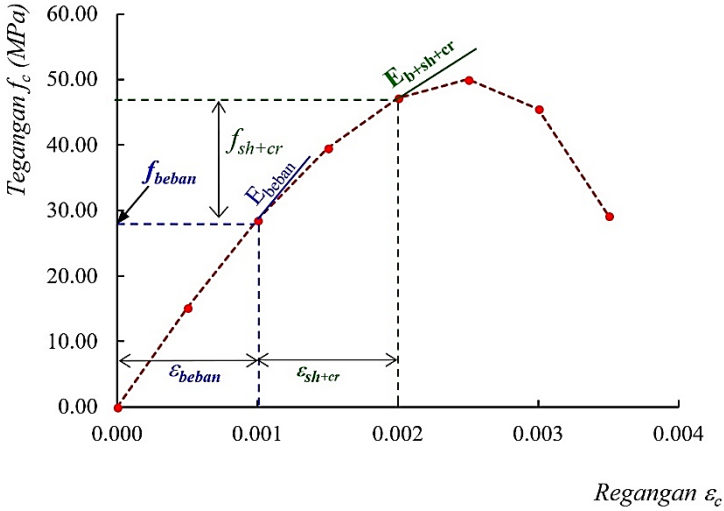


Gambar 6.9. Perilaku Rangkak sebagai Fungsi Waktu dan Beban

Tampak bahwa akibat beban akan terjadi regangan elastis. Regangan ini disebut elastis, karena akan hilang bila beban yang menyebabkan tegangan dihapuskan. Regangan elastis menicu terjadinya rangkak. Proses rangkak akan stabil pada usia sekitar tiga bulan. Apabila kemudian beban dihapuskan, terjadi penurunan regangan elastis (*elastic recovery*), dan penurunan regangan rangkak (*creep recovery*) namun demikian akan ada sebagian regangan rangkak yang bersifat permanen (*irreversible creep*).

6.5.4 Pengaruh Susut dan Rangkak

Akibat susut dan rangkak, maka beton mengalami regangan tambahan yang menurunkan modulus elastisitas dan kekakuan bahan. Semakin besar regangan susut dan rangkak, semakin meningkat juga tegangan sekunder dalam material (Gambar 6.10).



Gambar 6.10. Pengaruh Susut dan Rangkak pada Kekuatan dan Kekakuan Beton

6.6 RANGKUMAN

1. Besi tulangan pada beton bertulang dan tendon pada beton prategang berfungsi untuk menahan gaya tarik yang terjadi pada struktur beton.
2. Susut dan rangkak yang berlebihan akan menyebabkan timbulnya retak pada struktur beton.

BAB 7
BAHAN TAMBAH

Tujuan Umum:

1. Mahasiswa mengetahui jenis-jenis *additive* (bahan tambah) yang digunakan pada beton.

Tujuan khusus:

1. Mahasiswa mengetahui fungsi *superplasticiser*, *retarder* dan *accelerator* pada beton.
2. Mahasiswa mengetahui bahan tambah kedap air untuk melindungi beton dari serangan korosi.

7.1 BAHAN TAMBAH (*ADDITIVE*)

Additive atau *admixture* bukan merupakan material utama untuk membentuk beton. Namun demikian *additive* dapat merubah perilaku beton segar dan beton yang telah mengeras secara fisik dan mekanik. Manfaat utama *admixture* adalah segi ekonomi. Perlu diingat bahwa fungsi *admixture* adalah untuk meningkatkan perilaku dan kekuatan (*behavior and performance*) beton. *Additive* bukan bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan yang terjadi pada beton karena kesalahan pembuatan maupun perencanaan seperti misalnya kesalahan dalam *mix design*, buruknya pengadukan atau pemadatan.

7.2 JENIS *ADMIXTURES*

Additive umumnya berupa bahan kimia yang ditambahkan pada adukan beton segar. Jumlahnya tidak boleh melebihi 5% berat beton. Material *additive* dapat berupa bahan organis atau an-organis. ASTM C494 mengkategorikan *additive* sebagai berikut:

- Type A : *Water Reducer* (mengurangi kebutuhan air).
- Type B : *Retarding* (memperlambat pengikatan).
- Type C : *Accelerating* (mempercepat pengikatan).
- Type D : Gabungan A+B.
- Type E : Gabungan A+C.
- Type F : *Superplasticizing* (meningkatkan *workability).*
- Type G : Gabungan B+F.

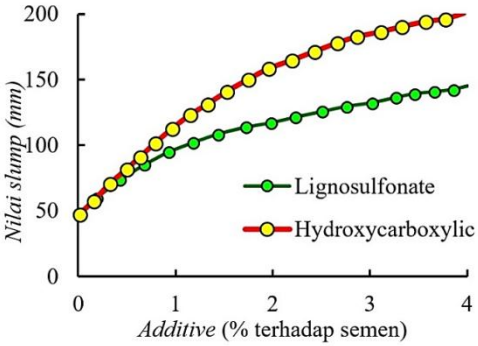
7.2.1 *Water Reducing Admixtures*

Water reducing admixture mengurangi jumlah air yang dibutuhkan untuk pengadukan. Pengurangan yang dapat dicapai berkisar antara 5-15% dari berat *w/c*. Manfaat utama *water reducer* adalah:

- Meningkatkan kelacakan (*workability*) dengan FAS yang tetap.
- Mengurangi FAS dengan workability tetap.

Dalam kedua hal, mutu beton akan meningkat karena beton lebih padat dan kuat tekan lebih tinggi. Mekanisme kerja *water reducer* adalah sebagai *surface-active-agent*. Bahan ini merubah perilaku bidang pertemuan antara dua bahan yang berbeda, dalam hal ini mortar dan agregat. *Additive* diserap semen sehingga semen menjadi bermuatan negatif, sedangkan agregat tetap bermuatan postif sehingga terjadi peningkatan tarik-menarik antara pasta semen dan agregat. Selain itu *additive* ini membuat gelembung udara tidak dapat mengikat di dalam interfasa, dan lebih mudah dikeluarkan dengan proses pemadatan. Ada dua *water reducer* yang umum digunakan:

- *Hydroxycarboxylic* (bersifat asam).
- *Lignosulfonate.*



Gambar 7.1. Pengaruh Water Reducer pada Kekentalan

Gambar 7.1 adalah ilustrasi pengaruh *water reducer* sebagai fungsi persentase *additive* pada kekentalan adukan dalam nilai *slump.*

7.2.2 *Retarding Additives*

Retarder pada dasarnya memperlambat proses hidrasi semen dengan *tidak* merubah susunan maupun sifat produk hidrasi. *Retarder* dapat dipakai misal pada suhu udara yang tinggi yang akan berpengaruh pada kecepatan

waktu ikat. Bahan utama *retarder* adalah *gula, garam-zinc*, larutan *borat* dan komponen *carbohydrate*.

Penggunaan *retarder* berkelebihan bisa menghentikan proses hidrasi. Dengan penambahan *retarder* sejumlah 0.05% berat semen, bisa diperbolehkan penundaan sampai 4 jam. Pemakaian 0.2% sampai 1% akan menghentikan hidrasi semen secara total.

Kuat tekan beton dengan usia dibawah 7 hari akan sangat menurun bila digunakan *retarder*, tetapi untuk usia beton di atas 7 hari tampak adanya peningkatan kuat tekan, bila dibandingkan yang tidak menggunakan *retarder*. Pengaruh negatif lain adalah meningkatnya susut plastis beton.

7.2.3 *Accelerating Additives*

Yang dimaksud dengan *accelerator* adalah untuk bahan tambahan yang bertujuan mempercepat tercapainya kuat tekan beton awal. Sebagai akibat dari penggunaan *additive* ini adalah bahwa waktu ikat awal juga akan terjadi lebih dini. Penggunaan *additive* ini terutama pada pembuatan beton dalam suhu rendah, beton pracetak, selanjutnya cetakan segera dipakai kembali, atau pekerjaan perbaikan atau perawatan yang mendesak.

Keuntungan pemakaian *accelerator* adalah pembongkaran cetakan/ bekisting dapat dilakukan lebih cepat danpekerjaan penghalusan permukaan yang lebih cepat sehingga struktur bisa segera digunakan. Penggunaan *accelerator* dalam cuaca panas bisa mengakibatkan peningkatan panas hidrasi, dan retak susut yang besar. Material utama *additive* ini adalah adalah *Calcium chloride*. Adanya unsur *chloride* dalam kombinasi dengan oksigen dan air meningkatkan resiko karat pada tulangan, dalam beton bertulang.

7.2.4 *Superplasticizers*

Superplasticizer merupakan *polimer organic* yang larut dalam air. Bahan penyusunnya berupa *garam-garam sodium* atau *garam calcium*. *Additive* ini menjaga kesetimbangan muatan elektrostatis dalam partikel semen dan mencegah terjadinya *floculasi* (proses terbentuknya *floc* dalam cairan) selama proses hidrasi dan *adsorpsi* (terkumpulnya air di permukaan) partikel semen. Cara kerja *superplasticizer* terutama adalah membungkus partikel semen dan menciptakan medan elektromagnetik negatif sehingga *floc* yang terbentuk mendapat kesempatan untuk bereaksi dengan air.

Manfaat *superplasticizer* adalah: menghasilkan adukan dengan kelacakan tinggi sehingga terjadinya keropos terhindari dan dihasilkannya beton mutu tinggi karena FAS dapat ditekan sehingga beton menjadi sangat padat. Adukan dengan FAS tetap dapat menghasilkan *slump* 200 mm bila diberi *superplasticizer*, sedang *slump* 15 mm akan dihasilkan apabila adukan tidak memakai *superplasticizer*. Adukan dengan *workability* tinggi mudah dipadatkan.

Penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan FAS rendah sebesar 0.2 dapat dihasilkan beton dengan kuat tekan f'_c = 150 MPa. *Superplasticizer* dapat meningkatkan *slump* sekitar 25% -35% bila dibandingkan dengan adukan tanpa *additive*. Peningkatan kuat tekan yang terjadi sebenarnya bukan disebabkan oleh *superplasticizer*, tetapi lebih karena sebaran partikel semen yang lebih merata yang mengakibatkan hidrasi yang lebih sempurna. *Superplasticizer* pada dasarnya tidak mempengaruhi waktu ikat, tidak mempengaruhi susut, rangkak maupun modulus elastis (E_{ci}) beton.

Selain yang telah disebut diatas, terdapat serangkaian *additive* khusus, misalnya untuk membuat beton kedap air (*waterproofing*), anti bakteri, dan lain-lain. Untuk informasi tentang *additive* dapat dipelajari di *website* SIKA (idn.sika.com) atau BASF (www.asiapasific.basf.com).

7.2.5 Bahan Kedap Air

Beton bukanlah material yang bersifat kedap air secara sempurna. Cairan bisa masuk ke dalam beton melalui pori dan kapiler yang terbentuk ketika air bebas yang tersisa pada proses hidrasi semen menguap. Ion korosif yang terkandung di dalam air seperti sulfat dan klorida bisa masuk dan mencapai permukaan tulangan yang ada di dalam beton melalui kapiler. Sehingga agar beton terlindung dari serangan korosi maka beton harus didesain kedap air. Ada tiga tipe bahan atau sistem yang bisa membuat beton menjadi kedap air yaitu: Membran, *Coating*, dan *Integral Waterproofing*.

Membran merupakan suatu bahan yang berupa lembaran-lembaran tipis umumnya mempunyai ketebalan sekitar 1–5 mm. Bahan dasar untuk membuat membran umumnya terbuat dari bitumen atau aspal. Lembaran-lembaran membran ini dipasang dipermukaan beton agar beton tidak bisa ditembus oleh air. Pemasangannya pada permukaan beton bisa dengan

metode pembakaran ataupun menggunakan perekat.

Bahan kedap air *coating* adalah salah satu metode untuk membuat beton tidak bisa ditembus air dengan cara melapiskan bahan *coating* dengan cara dikuaskan di permukaan beton. Bahan utama yang dipakai untuk membuat bahan pelapis kedap air jenis ini adalah berasal dari *rubber-latex* (karet). Permukaan beton yang sudah keras dikuas dengan bahan ini umumnya dilakukan beberapa lapisan (3 lapis). Ketika lapisan (*coating*) ini telah kering, akan terbentuk selimut tipis kurang dari 0.1 mm yang kedap air. *Coating* ini harus dilindung dengan lapisan mortar agar lebih tahan lama dan tidak cepat rusak karena perubahan suhu dan cuaca.

Integral waterproofing merupakan suatu metode dengan menambah-kan suatu bahan tambah atau bahan kimia ke dalam beton segar, sehingga ketika beton telah menjadi keras beton bisa menjadi lebih kedap air. Jadi bahan tambah ini akan menyatu dengan beton selamanya. Tingkat kekedapan air bisa diukur dengan uji absorpsi atau uji permeabilitas. Menurut Neville (1995), bahan *integral waterproofing* bisa berasal dari *asam stearate* dan emulsi dari bitumen. Bahan yang berasal dari *stearate* akan meningkatkan beton menjadi bersifat *hydrophobic*.Sedangkan bahan yang berupa emulsi dari bitumen akan mengisi pori-pori kapiler. Butiran-butiran bitumen ini akan bersatu menjadi semacam pembendung (*power blocker)* ketika ada tekanan cairan yang akan masuk ke dalam beton melalui kapiler.

Maryoto (2017) telah melakukan penelitian dengan menggunakan *calcium stearate* sebagi bahan kedap air. *Calcium stearate* mempunya rumus kimia Ca $(C_{18}H_{35}O_2)_2$. Warnaya putih seperti tampak pada Gambar 7.1. Butiran *calcium stearate* sangat halus bahkan lebih halus dari butiran semen dan mempunyak titik leleh pada suhu 120^oC. Kandungan asam lemak maksimum 0.5% dan kehilangan berat saat dikeringkan maksimum 2%. *Calcium stearate* mempunyai berat jenis sekitar 0.25. Keunikan material ini adalah tidak bisa bereaksi dengan air bila tidak digunakan media bantu yang lain.

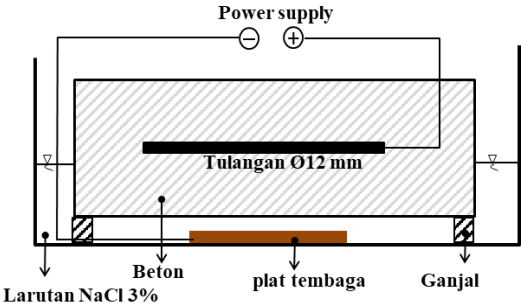
Gambar 7.2. Calcium Stearate

Calcium Stearate ditambahkan pada beton dengan kadar 0, 1, 5, dan 10 kg/m^3 beton. Pengujian absorpsi dan korosi dipercepat dilakukan untuk mengetahui serapan air beton dan kemampuan beton dalam menahan serangan korosi. Pengujian absorpsi dilakukan dengan mengikuti standar SKSNI S-36-1990-03. Benda uji absorpsi berupa silinder berukuran diameter 7.5 cm dan tinggi 15 cm. Setelah benda uji dirawat selama 28 hari, silinder dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 100±5^{o}C selama 3 hari. Benda uji dikeluarkan dari oven dan diangin-anginkan selama 1 hari di suhu ruang. Benda uji ditimbang kering sehingga diperoleh beratnya (a). Selanjutnya benda uji direndam di dalam air selama 30 menit, kemudian dikeluarkan dari dalam rendaman air dan dikeringkan dengan cara mengelap dengan lap yang menyerap air. Benda uji ditimbang lagi dan diperoleh berat basah (b). Absorpsi air oleh beton bisa dihitung dengan rumus di bawah ini.

$$\text{Serapan air (\%)} = \frac{b-a}{a} \text{ x } 100\% \qquad (7.1)$$

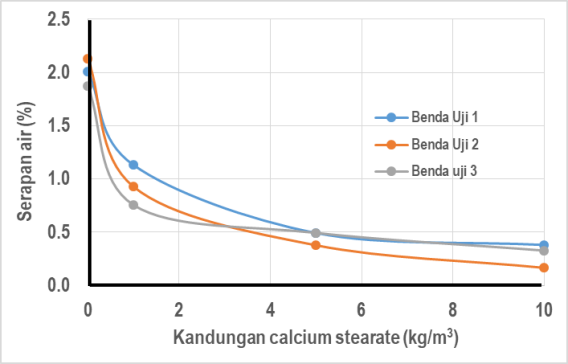
Korosi dipercepat merupakan suatu metode perekayasaan terhadap proses korosi sehingga proses tersebut berjalan cepat. Seperti kita ketahui, proses korosi alami yang terjadi pada tulangan beton memerlukan waktu puluhan tahun. Skema korosi dipercepat dapat dilihat pada Gambar 7.2. Suatu benda uji beton bertulang direndam dalam air asin dengan kandungan NaCl sebanyak 3%. Tulangan yang ada di dalam beton dihubungkan dengan suatu kabel dan kabel tersebut dihubungkan dengan anoda *power supply*. Bagian katoda *power supply* dihubungan dengan batangan tembaga yang diletakkan di dalam air asin di bawah benda uji. Proses korosi akan mulai

berlangsung saat *power supply* dinyalakan dengan besaran aliran arus tertentu. Penyetelan arus ini dilakukan untuk membangkitkan proses korosi berjalan cepat atau lambat. Semakin tinggi arus yang diset pada *power supply*, proses korosi berjalan semakin cepat. Perhitungan persentase korosi bisa diketahui dengan menimbang tulangan sebelum dan sesudah terjadi korosi.

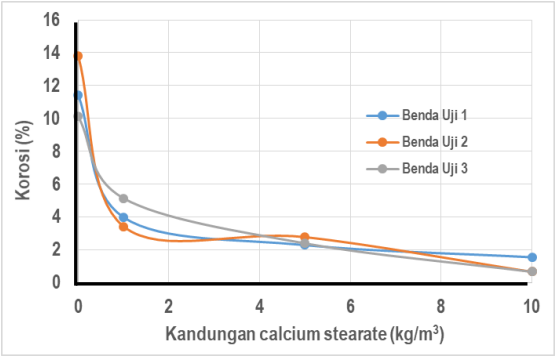


Gambar 7.3. Proses Korosi Diperepat

Hasil pengujian serapan air dan korosi terhadap beton dengan bahan tambah *calcium stearate* ditampilkan dalam Gambar 7.3 dan 7.4.



Gambar 7.4. Absorpsi Beton Mutu 30 Mpa



Gambar 7.5. Korosi pada Tulangan Beton Mutu 30 MPa

Berdasarkan Gambar 7.3 dan 7.4 diperoleh informasi bahwa dengan penambahan *calcium stearate* pada absorpsi beton dan serangan korosi semakin turun. Semakin besar kandungan *calcium stearate* ditambahkan pada beton, semakin rendah absorpsi dan serangan korosi pada beton. Hal ini disebabkan oleh ion stearate bereaksi dengan kalsium hidroksida yang terbentuk pada proses hidrasi semen. Hasil reaksi tersebut berupa senyawa yang bersifat seperti lilin yang melapisi permukaan kapiler di dalam beton. Akibatnya beton menjadi bersifat *hydrophobic*, sehingga air dan ion korosif lebih sulit untuk meresap ke dalam beton melalui kapiler. Dengan lapisan senyawa yang seperti lilin pada permukaan kapiler beton juga menyebabkan sudut kontak yang terbentuk antara air dan beton menjadi lebih besar. Reaksi ion stearate dan pasta semen bisa dilihat seperti persamaan kimia di bawah ini.

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \qquad (7.2)$$

Calcium Silicate Hydrate

$$Ca(OH)_2 + RCOOH \rightarrow Ca^+COOR^- + H_2O \qquad (7.33)$$

Calcium hydroxide(lime)+ stearate → insoluble calcium stearate + air (Sobolev dkk, 2013)

7.3. RANGKUMAN

1. *Superplasticiser* adalah bahan tambah yang digunakan untuk membuat beton menjadi lebih plastis atau mudah dikerjakan, tanpa mengubah faktor air semen yang digunakan.
2. *Retarder* adalah bahan tambah yang digunakan untuk memperlambat pengerasan atau waktu ikat beton.
3. *Accelarator* adalah bahan tambah yang digunakan untuk mempercepat pengerasan atau waktu ikat beton.
4. Bahan tambah kedap air bisa menurunkan serangan korosi pada tulangan beton.

7.4. LATIHAN

1. Bahan apakah yang harus ditambahkan ke dalam beton agar *workability* lebih bagus tetapi tidak menurunkan kuat tekan beton?
2. Suatu truk *concrete mixer* harus mengirim beton dari *plant* ke proyek memerlukan waktu kirim beton segar selama 7 jam, agar beton tidak mengeras di jalan bahan tambah apa yang harus ditambahkan ke dalam beton?
3. Suatu kontraktor ingin mempercepat pembongkaran beton yang dicor lebih cepat 7 hari dari pekerjaan normal, apa yang harus dilakukan terhadap beton segar?
4. Bagaimana mekanisme membuat beton menjadi kedap air?
5. Jelaskan apa yang disebut integral *waterproofing concrete*!

BAB 8
SOAL DAN PENYELESAIAN

Soal 1

Sebuah silinder beton berukuran 150 x 300 mm diuji pada usia 90 hari. Perilaku tegangan-regangan pada usia tersebut tampak pada Gambar 1. Fungsi tegangan-regangan dapat dirumuskan sebagai:

$$f_{c(90)} = -(9{,}2x10^6)\,\varepsilon^2 + (46x10^3)\,\varepsilon$$

Dimana:

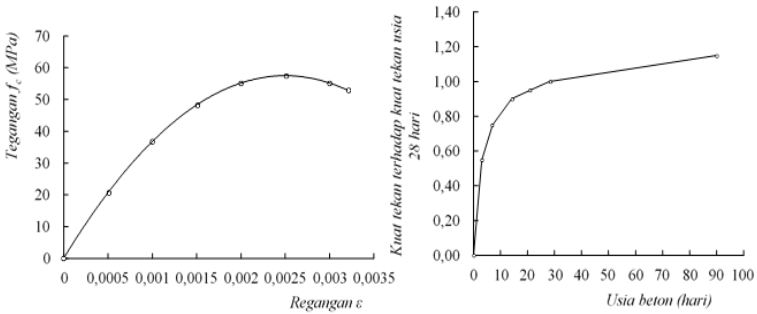
$f_{c(90)}$: Kuat tekan beton dalam MPa

ε : Regangan beton tekan

Pada silinder bekerja gaya yang menimbulkan rengangan:

ε_{beban} = 0.0025

a. Berapa beban (dalam kN) yang mengakibatkan regangan tersebut?
b. Tentukan besar *Modulus Elastisitas Tangensial* ($E_{tangensial}$) dan *Sekan* (E_{sekan}) secara grafis dan secara analistis. Berapakah kuat tekan karakteristik *f'c* pada usia 28 hari? Perilaku beton sebagai fungsi waktu tampak pada Gambar 2.



Gambar 8.1. Perilaku f – ε dan Peningkatan Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Hari

Penyelesaian

Modulus elastisitas tangenisal dicari dari garis singgung pada fungsi tegangan-regangan dan merupakan turunan pertama dari fungsi tersebut terhadap sumbu datar (ε).

$f_{c(90)} = -(9{,}2x10^6)\ \varepsilon^2 + (46x10^3)\ \varepsilon$

$E_{tangensial} = \dfrac{df_c}{d\varepsilon} = -2\ x\ 9{,}2\ x10^6\varepsilon + 46x10^3$

Modulus elastisitas sekan dihitung langsung sebagai:

$E_{sekan} = \dfrac{f_c}{\varepsilon}$

Pada silinder bekerja gaya tekan yang mengakibatkan regangan

$\varepsilon_{beban} = 0.0025$

$$f_{c(beban)} = -(9{,}2x10^6)\ \varepsilon^2 + (46x10^3)\ \varepsilon$$

$$f_{c(beban)} = -(9{,}2x10^6)\ 0.0025^2 + (46x10^3)\ 0.0025 = 57.5\ MPa$$

Maka beban yang mengakibatkan tegangan tersebut dapat dihitung:

$f_c = \frac{P}{A}$ sehingga

$$P = f_c\ A = 57.5\ \left(\frac{1}{4}\pi D^2\right) = 57.5\ \left(\frac{1}{4}\pi 150^2\right) = 1016517\ N$$
$$= 1016.52\ kN$$

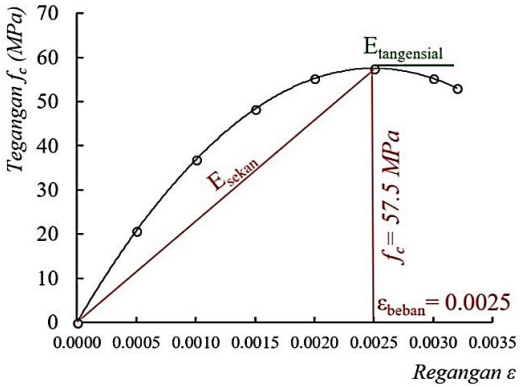
Modulus Elastisitas

$E_{tangensial} = \frac{df_c}{d\varepsilon} = -2\ x\ 9{,}2\ x10^6\varepsilon + 46x10^3$ utk $\varepsilon = 0.0025$

$E_{tangensial} = -2\ x\ 9{,}2\ x10^6(0.0025) + 46x10^3 = 0\ MPa$

$E_{sekan} = \dfrac{f_c}{\varepsilon} = \dfrac{1016517}{0.0025} = 23000\ MPa$

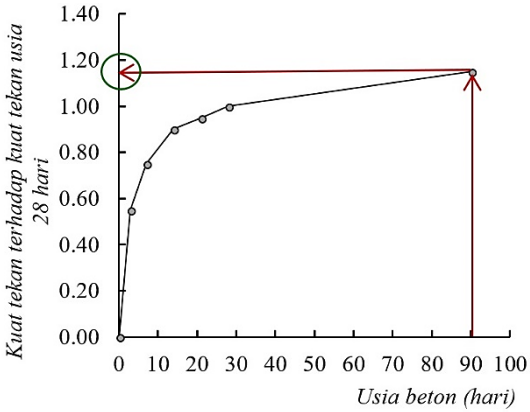
Secara grafis, modulus elastisitas dapat digambarkan sebagai fungsi garis singgung (untuk modulus tangensial) atau sebagai sisi miring segitiga tegangan-regangan.



Gambar 8.2. Perilaku f – ε

Rumusan yang diberikan dalam BS-EN atau ACI hanya bisa digunakan untuk modulus elastisitas tangensial awal, dan tak dapat dipakai pada modulus elastisitas bahan yang sudah menderita tegangan.

Kuat tekan pada usia 28 hari dicari dari koefisien kuat tekan sebagai fungsi waktu.



Gambar 8.3. Peningkatan Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Hari

Sehingga disimpulkan beton telah mencapai kuat tekan 115% terhadap kuat tekan beton karakteristik f'_c usia 28 hari.

Untuk $f_{(c)beban}$ = 57.5 MPa diperoleh $E_{tangensial}$ = 0, sehingga ini adalah kuat tekan tertinggi yang dapat dipikul beton, dan merupakan kuat tekan karakteristik 90 hari.

Kuat tekan karakteristik 28 dihitung: $f'_c = \frac{f_{c(90)}}{1.15} = \frac{57.5}{1.15} = 50$

Soal 2

Tentukan benda uji manakah yang memiliki kuat tekan tertinggi pada usia 28 hari. Jelaskan tahapan yang Anda lakukan dan perhitungan yang dikerjakan untuk menjawab pertanyaan ini.

Tabel 8.1. Data Berbagai Benda Uji Beton

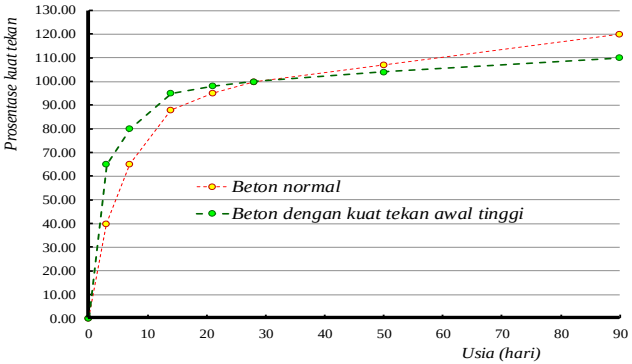
Bentuk Benda Uji	Kuat Tekan	Satuan	Usia Pengujian (hari)	Jenis Beton
Silinder 100x200	59.12	Mpa	50	Normal
Kubus 200x200x200	617.5	kg/cm^2	7	Kuat awal tinggi
Kubus 150x150x150	650.0	kg/cm	28	Normal
Silinder 150x300	59.35	MPa	90	Kuat awal tinggi

Tabel 8.2. Perbandingan Kuat Tekan Berbagai Ukuran Benda Uji

Benda Uji	Perbandingan Kekuatan Tekan
Kubus 150x150x150 mm	1.00
Kubus 100x100x100 mm	1.03
Kubus 200x200x200 mm	0.95
Kubus 300x300x300 mm	0.76
Silinder 150x300 mm	0.83
Silinder 100x200 mm	0.85

Tabel 8.3. Prosentase Peningkatan Kuat Tekan Sebagai Fungsi Waktu

Usia	% Kuat Tekan Beton Normal	% Kuat Tekan Beton Kuat Tekan Awal Tinggi
0	0	0
3	40	65
7	65	80
14	88	95
21	95	98
28	100	100
50	107	104
90	120	110



Gambar 8.4. Prosentase Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Waktu

Penyelesaian

Semua dikonversi ke kubus 150x150x150 usia 28 hari

- Silinder 100x200 mm f'_{c50} = 59.12 MPa, beton normal, usia 50 hari.

  Konversi usia: $f_c' = \frac{f'_{c50}}{1.07} = \frac{59.1}{1.07} = 55.25$ MPa

  Konversi bentuk ke kubus: $f_c' = \frac{f_c'}{0.85} = \frac{55.25}{0.85} = 65$ MPa

  Konversi satuan: $f_c' = 65\ MPa \rightarrow K = 650\ kg/cm^2$
- Kubus 200x200x200 mm K_7 = 494 kg/cm^2, beton kuat tekan awal tinggi, usia 7 hari.

  Konversi usia: $K = \frac{K_5}{0.8} = \frac{494}{0.80} = 617.5$ kg/cm^2

  Konversi bentuk ke kubus: $K = \frac{K}{0.95} = \frac{617.5}{0.95} = 650$ kg/cm^2
- Kubus 150x150x150 mm K 650 kg/cm^2, beton normal, usia 28 hari.

  Konversi usia: $K = \frac{K_{28}}{1} = \frac{650}{1.0} = 650$ kg/cm^2

  Konversi bentuk ke kubus: $K = \frac{K}{1} = \frac{650}{1} = 650$ kg/cm^2
- Silinder 150x300 mm f'_{c90} = 59.35 MPa, beton kuat tekan awal tinggi, usia 90 hari.

  Konversi usia: $f_c' = \frac{f'_{c90}}{1.10} = \frac{53.34}{1.10} = 53.95$ MPa

  Konversi bentuk ke kubus: $f_c' = \frac{f_c'}{0.83} = \frac{53.95}{0.83} = 65$ MPa

  Konversi satuan: $f_c' = 65\ MPa \rightarrow K = 650\ kg/cm^2$

Kesimpulan: Ternyata keempat benda uji tersebut mempunyai kuat tekan yang sama pada usia 28 hari, dan beton mempunyai mutu yang sama.

Soal 3

Gambarkan diagram hubungan tegangan-regangan (dalam MPa) beton usia 28 hari dalam *satu sistem salib sumbu* apabila diketahui bahwa:

a) Perilaku beton linier sampai pada batas 40% kuat tekan terbesar.
b) Beton runtuh pada regangan 0.003.
c) Data laboratorium terhadap benda uji adalah sebagai berikut, semua benda uji ditest pada usia 28 hari.

Konversikan seluruh data ke silinder standar ukuran 150 x 300 mm

Tabel 8.4. Data Benda Uji dan Kuat Tekan

Nomor Benda Uji	Bentuk Benda Uji	Dimensi Benda Uji (mm)	Kuat Tekan
1	Kubus	150x150x150	250 kg/cm^2
2	Silinder	300x150	40 MPa
3	Kubus	200x200x200	125 kg/cm^2
4	Silinder	200x100	60 MPa

Penyelesaian

Tabel 8.5. Data Konversi Benda Uji dari PBI 71

Benda Uji	Perbandingan Kuat Tekan
Kubus 15 x 15 x 15 cm	1,00
Kubus 20 x 20 x 20 cm	0,95
Silinder 15 x 30 cm	0,85

Lakukan konversi hasil uji tekan untuk menyamakan satuan dan jenis benda uji :

Untuk silinder dimensi 20 x 15 dilakukan perbandingan dimensi untuk mengetahui faktor konversinya :

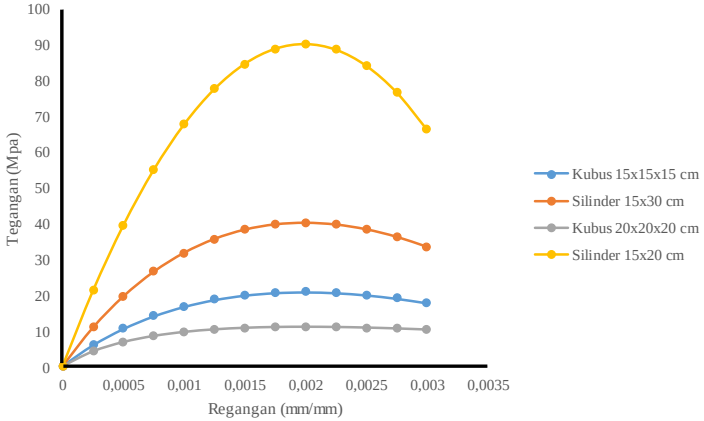
$$\frac{t1}{t2} = \frac{0,83}{x}$$

$$\frac{30}{20} = \frac{0,83}{x}$$

$$X = 0.553$$

Tabel 8.6. Perhitungan Konversi Kuat Tekan

Bentuk Benda Uji	Dimensi Benda Uji (cm)	Kuat Tekan	Konversi Satuan (MPa)	Konversi Hasil (MPa) Sesuai Jenis Benda Uji	Batas Linear (40% Kuat Tekan)
Kubus	15x15x15	250 kg/cm^2	25	$(\frac{25 * 0,83}{1})$ = 20,75	8.3 MPa
Silinder	30x15	40 MPa	40	40	10 MPa
Kubus	20x20x20	125 kg/cm^2	12.5	$(\frac{12,5 * 0,83}{0,95}) = 10,92$	4.368 MPa
Silinder	20x15	60 MPa	60	$(\frac{60 * 0,83}{0,553}) = 90,05$	36.02 MPa



Gambar 8.5. Diagram Tegangan–Regangan Berbagai Ukuran Benda Uji

Soal 4

Pengujian di laboratorium dilakukan untuk menentukan *peningkatan kuat tekan beton sebagai fungsi dari waktu* dalam hari. Karena keterbatasan cetakan, beton dituang dalam berbagai bentuk cetakan. Hasil pengujian kuat tekan pada usia 28 hari menunjukkan nilai sebagai berikut:

Tabel 8.7. Data Berbagai Benda Uji Beton

Bentuk Benda Uji	Usia Pengujian (hari)	Kuat Tekan	Satuan Kuat Tekan
Kubus 150x150x150	0	0.00	kg/cm^2
Kubus 150x150x150	2	241.01	kg/cm^2
Kubus 150x150x150	4	311.75	kg/cm^2
Kubus 150x150x150	6	352.88	kg/cm^2
Kubus 100x100x100	8	395.66	kg/cm^2
Kubus 100x100x100	10	421.92	kg/cm^2
Kubus 100x100x100	12	444.80	kg/cm^2
Kubus 200x200x200	14	425.88	kg/cm^2
Kubus 200x200x200	16	441.51	kg/cm^2
Kubus 200x200x200	18	450.11	kg/cm^2
Kubus 300x300x300	20	366.34	kg/cm^2
Kubus 300x300x300	22	370.71	kg/cm^2
Silinder 150x300	24	40.76	Mpa
Silinder 150x300	26	41.17	MPa
Silinder 150x300	28	41.50	Mpa

Gambarkan *kurva hubungan peningkatan kuat tekan terhadap waktu.* Peningkatan kuat tekan digambarkan pada sumbu tegak, dan fungsi waktu pada sumbu datar. Jelaskan bagaimana Anda memperoleh kurva tersebut.

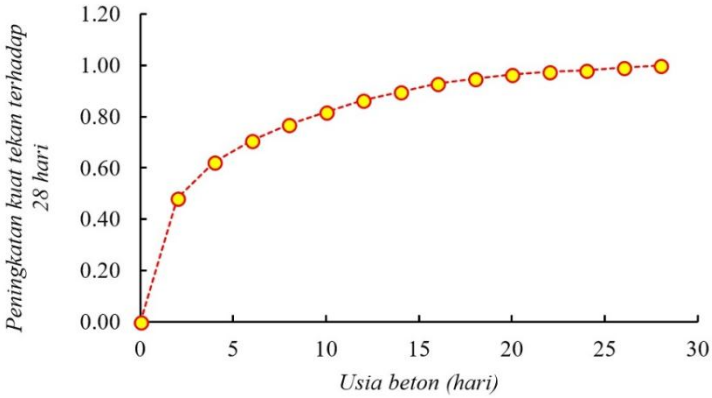
Penyelesaian

Tabel 8.8. Alternatif 1, Semua Benda Uji Dikonversi ke Kubus 150x150x150

Bentuk Benda Uji	Usia Pengujian (hari)	Kuat Tekan (MPA atau kg/cm2)	Kuat Tekan dalam kg/cm^2	Koefisien Bentuk	Konversi ke Kubus : dibagi/koefisien (kg/cm^2)	Rasio ke 28 hari
Kubus 150x150x150	0	0.00	0.00	1	0.00	0.00
Kubus 150x150x150	2	241.01	241.01	1	241.01	0.48
Kubus 150x150x150	4	311.75	311.75	1	311.75	0.62
Kubus 150x150x150	6	352.88	352.88	1	352.88	0.71
Kubus 100x100x100	8	395.66	395.66	1.03	384.14	0.77
Kubus 100x100x100	10	421.92	421.92	1.03	409.64	0.82
Kubus 100x100x100	12	444.80	444.80	1.03	431.84	0.86
Kubus 200x200x200	14	425.88	425.88	0.95	448.30	0.90
Kubus 200x200x200	16	441.51	441.51	0.95	464.75	0.93
Kubus 200x200x200	18	450.11	450.11	0.95	473.80	0.95
Kubus 300x300x300	20	366.34	366.34	0.76	482.02	0.96
Kubus 300x300x300	22	370.71	370.71	0.76	487.78	0.98
Silinder 150x300	24	40.76	407.59	0.83	491.07	0.98
Silinder 150x300	26	41.17	411.68	0.83	496.00	0.99
Silinder 150x300	28	41.50	415.00	0.83	500.00	1.00

Tabel 8.9. Alternatif 2, Semua Benda Uji Dikonversi ke Silinder 150x300. Kita Harus Konversikan ke Kubus 150x150x150 Dahulu, Kemudian Semua Dikalikan 0.83

Bentuk Benda Uji	Usia Pengujian (hari)	Kuat Tekan (MPa/kg/cm^2)	Dalam Mpa	Konversi ke Kubus: dibagi koefisien	Konversi ke Silinder: dikalikan 0.83	Kuat Tekan (MPa)	Rasio ke 28 hari
Kubus 150x150x150	0	0.00	0.00	1	0.83	0.00	0.00
Kubus 150x150x150	2	241.01	24.10	1	0.83	20.00	0.48
Kubus 150x150x150	4	311.75	31.18	1	0.83	25.88	0.62
Kubus 150x150x150	6	352.88	35.29	1	0.83	29.29	0.71
Kubus 100x100x100	8	395.66	39.57	1.03	0.81	31.88	0.77
Kubus 100x100x100	10	421.92	42.19	1.03	0.81	34.00	0.82
Kubus 100x100x100	12	444.80	44.48	1.03	0.81	35.84	0.86
Kubus 200x200x200	14	425.88	42.59	0.95	0.87	37.21	0.90
Kubus 200x200x200	16	441.51	44.15	0.95	0.87	38.57	0.93
Kubus 200x200x200	18	450.11	45.01	0.95	0.87	39.33	0.95
Kubus 300x300x300	20	366.34	36.63	0.76	1.09	40.01	0.96
Kubus 300x300x300	22	370.71	37.07	0.76	1.09	40.49	0.98
Silinder 150x300	24	40.76	40.76	0.83	1.00	40.76	0.98
Silinder 150x300	26	41.17	41.17	0.83	1.00	41.17	0.99
Silinder 150x300	28	41.50	41.50	0.83	1.00	41.50	1.00



Gambar 8.6. Peningkatan Kuat Tekan Sebagai Fungsi Waktu

Ternyata hasil yang didapatkan sama.

Pada metoda pertama, semua nilai kuat tekan dikonversikan menjadi kubus 150x150x150 dengan membagi nilai kuat tekan dengan koefisien konversi bentuk.

Pada metode kedua, semua dikonversikan menjadi silinder 150x300. Karena koefisien konversi yang tersedia terhadap kubus, maka seluruh nilai harus dibagi koefisien, kemudian dikalikan 0.83, menjadi silinder.

Pada hasil akhir, semua angka kuat tekan dibagi dengan nilai kuat tekan usia 28 hari yang menjadi standar.

Soal 5

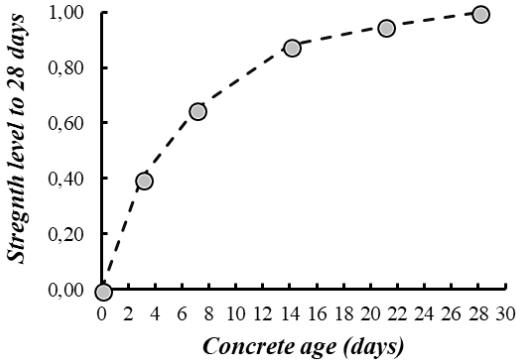
Perencana menentukan mutu beton pelat tersebut sebesar f'_c = 50 MPa. Benda uji kubus yang dibuat di lapangan berukuran 200x200x200 mm, dan diuji pada usia 7 hari. Ternyata hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa kubus tersebut mempunyai kuat tekan 300 kg/cm^2.

Apakah pelat tersebut memenuhi syarat yang ditentukan perencana? Sertakan hitungan Anda!

Data korelasi bentuk benda uji, dan peningkatan kuat tekan beton sebagai fungsi waktu terlampir.

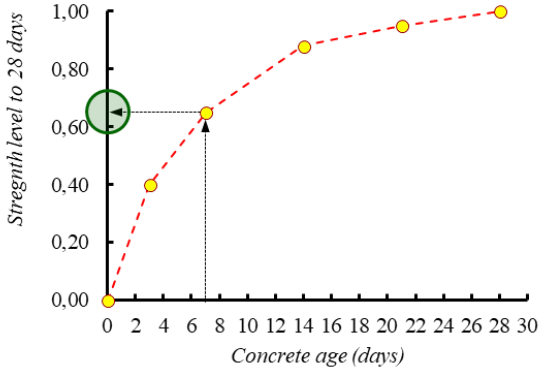
Tabel 8.10. Koefisien Konversi Benda Uji

Benda Uji	Koefisien Kuat Tekan
Kubus 150x150x150 mm	1.00
Kubus 100x100x100 mm	1.03
Kubus 200x200x200 mm	0.95
Kubus 300x300x300 mm	0.76
Silinder 150x300 mm	0.83



Gambar 8.7. Peningkatan Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Waktu

Penyelesaian



Gambar8.8. Peningkatan Kuat Tekan Beton Sebagai Fungsi Waktu

Perencana menentukan standar bahan beton f'_c = 50 MPa, berarti benda uji berupa silinder 150 x 300 mm pada usia 28 hari.

Benda uji lapangan berupa kubus 200x200x200 mm.

Pada usia 7 hari ternyata mencapai kuat tekan 300 kg/cm^2. Dari grafik pada 7 hari beton mencapai **0.65** dari kekuatan 28 hari. Jadi perkiraan kekuatan yang dicapai waktu beton mencapai 28 hari adalah:

$K_{28} = \frac{K_7}{0.65} = \frac{300}{0.65} = 461.5$ kg/cm^2

Kubus 200x200x200 mempunyai kekuatan **0.95** terhadap kubus standar 150x150x150, sehingga kuat tekan untuk kubus standar 150x150x150 menjadi:

$K_{150} = \frac{K_{200}}{0.95} = \frac{461.5}{0.95} = 485.8$kg/cm^2

Karena perencana menggunakan dasar *silinder*, satuan harus dikonversi ke *MPa*.

$485.8 \frac{kg}{cm^2} = 48.6\ MPa$

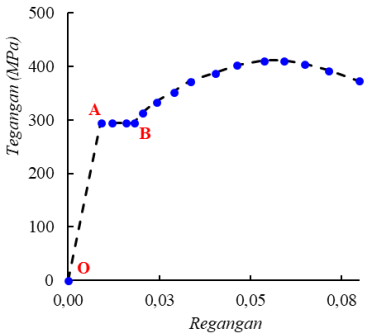
Kubus 150x150x150 harus dikonversikan ke silinder 150 x 300 dengan koefisien **0.83**

$f'_c = \mathbf{0.83}\ x\ K = 0.83\ x\ 48.6 = 40.3$ MPa

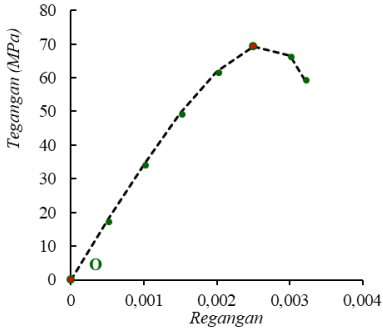
Jadi, beton tidak memenuhi syarat karena f'_c= 40.3 MPa <f'_c rencana = 50 Mpa.

Soal 6

Gambar berikut menunjukkan hubungan tegangan-regangan bahan baja dan beton.



Gambar 1



Gambar 2

Gambar 8.9. Hubungan Tegangan dan Regangan

a. Diagram yang mana merupakan properti baja, dan yang mana beton? Apa alasan Anda?

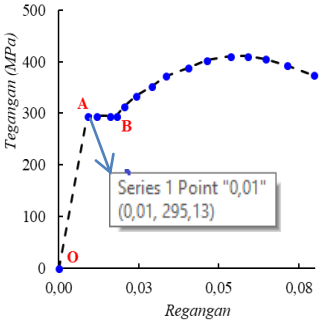
b.

- Tentukan modulus elastisitas bahan untuk daerah O-A pada Gambar I.
- Bahan mana yang memiliki kekuatan lebih tinggi?
- Berapakah regangan yang terjadi pada saat bahan hancur untuk Gambar II?
- Apa perbedaan perilaku bahan dalam Gambar II dengan Gambar I?
- Bagaimanakah bentuk benda uji yang dipakai dalam pengujian Gambar II?

Penyelesaian

a. Gambar 1 adalah diagram baja sedangkan Gambar 2 adalah diagram beton. Karena diagram baja terdapat daerah leleh pada titik A sampai B sedangkan beton tidak meleleh, serta materialnya berperilaku non-linier.

b.

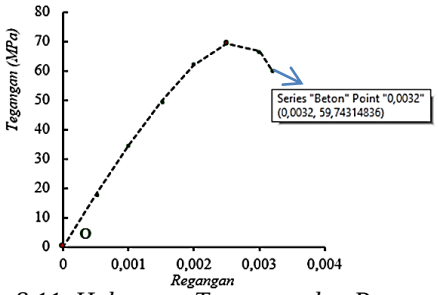


Gambar 8.10. Hubungan Tegangan dan Regangan Baja

- Modulus elastisitas O-A dapat diambil sebagai perbandingan tegangan dan regangan O-A. Didapat bahwa pada titik yang diambil nilai tegangan σ = 295,13 MPa dan nilai regangan ε = 0,001.Maka modulus elastisitas dapat dihitung,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{295{,}13}{0{,}01} = 29.513\ MPa$$

- Bahan baja lebih kuat, karena memiliki tegangan tertinggi sebesar 400 MPa, dan beton hanya 70 MPa.
- Regangan hancur beton adalah sekitar 0.0032.



Gambar 8.11. Hubungan Tegangan dan Regangan Beton

- Bahan baja mula-mula berperilaku linier, kemudian meleleh, lalu menjadi non-linier. Beton dari saat awal berperilaku non-linier.
- Benda uji dapat menggunakan kubus maupun silinder. Tergantung standar yang dirujuk, silinder dapat dikonversi menjadi kubus, dan sebaliknya.

Soal 7

Apa yang dimaksud dengan:

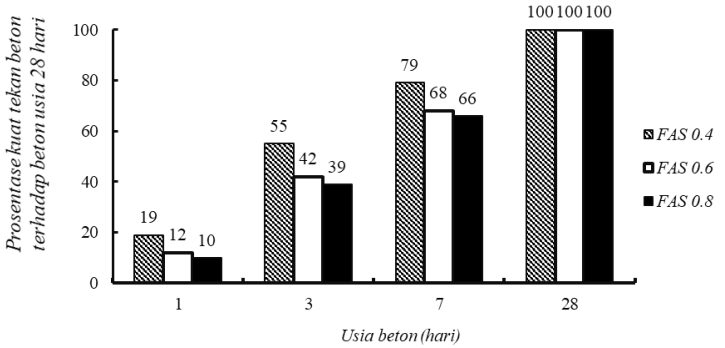
- *WCF*
- Interfasa
- *Bleeding*
- *Gap-graded*

Penyelesaian

- *WCF* adalah rasio berat air dari berat semen yang digunakan pada campuran beton. Semakin rendah rasio air maka semakin besar pula kekuatan dan ketahanan yang dihasilkan, tetapi dalam hal pencampuran dan pembentukan akan lebih susah.
- Interfasa adalah daerah beton yang berongga atau kosong akibat dari penguapan air yang terjadi pada proses pengeringan beton dan daerah ini merupakan daerah dengan kekuatan lekatan terlemah terhadap geser maupun tarik.
- *Bleeding* adalah kejadian dimana air campuran beton naik ke permukaan beton sesaat setelah beton selesai dicor dan partikel agregat kasar turun ke bawah. hal ini disebabkan karena *water cement ratio* yang digunakan terlalu tinggi atau adanya penambahan air pada saat pengecoran.
- *Gap-graded* adalah gradasi agregat dimana ukuran agregat yang ada tidak lengkap atau ada fraksi agregat yang tidak ada atau jumlahnya sedikit.

Soal 8

Gambar berikut menunjukkan data penelitian peningkatan *kuat tekan beton sebagai fungsi waktu*, untuk beberapa jenis FAS.



Gambar 8.12. Prosentase Kuat Tekan Beton dengan Bermacam-Macam Nilai FAS

Kesimpulan apakah yang dapat Anda tarik? Mengapa? Berilah analisa terhadap kesimpulan Anda termasuk sebab dan penjelasannya.

Penyelesaian

Perbedaan nilai FAS memberikan pengaruh pada kuat tekan beton pada semua usia. Semakin rendah nilai FAS, semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan. Hal ini adalah karena nilai FAS yang tinggi akan mengakibatkan beton banyak berongga, dan adanya pemisahan agregat yang berat dari adukan karena encer.

Juga tampak bahwa FAS yang rendah mengakibatkan kuat tekan 28 hari tercapai lebih cepat. Sebagai contoh pada usia 7 hari FAS 0.4 memberikan 19% pencapaian kuat tekan f'_c, sedang FAS 0.8 hanya mencapai 10%.

Hal ini disebabkan oleh semakin besar nilai FAS maka kandungan air dalam campuran beton semakin banyak dan hal tersebut menyebabkan adanya air berlebih dari kebutuhan air sebagai komponen reagen terhadap hidrasi semen.

Dasar dari adukan beton adalah reaksi kimia antara semen dan air yang menyebabkan terbentuknya pasta yang dapat mengikat komponen lainnya yakni agregat (kasar maupun halus). Adanya kelebihan air akan menyebab-

kan reaksi kimia berjalan kurang sempurna dan waktu ikat semen menjadi lebih lama, hal ini yang menyebabkan laju kuat tekan beton hingga mencapai kuat tekan sempurna nya berbeda pada beton dengan nilai FAS yang berbeda. Sedangkan untuk besar nilai kuat tekannya, beton pada umur yang sama dengan nilai FAS besar cenderung akan lebih kecil dibanding dengan yang nilai FAS kecil. Hal ini disebabkan adanya rongga udara dalam beton seiring makin banyaknya kandungan air bebas dalam beton yang menyebabkan beton dengan FAS besar tidak sepadat beton dengan FAS kecil.

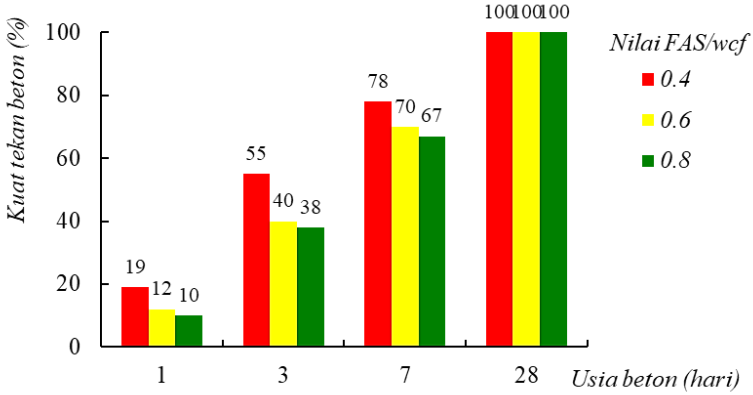
Intinya:

(a) Perkembangan kuat tekan beton untuk mencapai keadaan sempurna (kuat tekan 100%) pada FAS yang besar cenderung lebih lambat dari beton dengan FAS kecil, hal ini disebabkan adanya air bebas yang lebih banyak sehingga waktu ikat semen berjalan lebih lama.

(b) Kuat tekan beton pada umur yang sama dengan FAS yang besar cenderung lebih kecil dari beton dengan FAS yang kecil, hal ini disebabkan seiring besarnya kandungan air di dalam beton akan menyebabkan semakin banyaknya rongga udara di dalam beton. Sehingga beton dengan FAS kecil cenderung lebih padat dari beton dengan FAS besar.

Soal 9

Data terlampir menunjukkan kuat tekan beton (dalam % terhadap 28 hari) pada usia 1, 3, 7 dan 28 hari. Beton mempunyai falktor air semen (FAS) 0.4; 0.6 dan 0.8.



Gambar 8.13. Prosentase Kuat Tekan Beton dengan Bermacam-Macam Nilai FAS

- Bagaimana pengaruh FAS terhadap kuat tekan beton? Jelaskan jawaban Anda!
- Dengan mempelajari data di atas, bagaimanakah pengaruh FAS terhadap *peningkatan* kuat tekan beton sebagai fungsi usia beton? Mengapa demikian? Jelaskan!

Penyelesaian

- Perbedaan nilai FAS memberikan pengaruh terhadap kemampuan campuran beton untuk mencapai kuat tekan sempurnanya. Hal ini disebabkan oleh semakin besar nilai FAS maka kandungan air dalam campuran beton semakin banyak dan hal tersebut menyebabkan adanya air berlebih dari kebutuhan air sebagai komponen reagen terhadap hidrasi semen.
- Dasar dari adukan beton adalah reaksi kimia antara semen dan air yang menyebabkan terbentuknya pasta yang dapat mengikat komponen lainnya yaitu agregat (kasar maupun halus). Adanya kelebihan air akan

menyebabkan reaksi kimia berjalan kurang sempurna dan waktu ikat semen menjadi lebih lama, hal ini yang menyebabkan laju kuat tekan beton hingga mencapai kuat tekan sempurnanya berbeda pada beton dengan nilai FAS yang berbeda. Sedangkan untuk besar nilai kuat tekannya, beton pada umur yang sama dengan nilai FAS besar cenderung akan lebih kecil dibanding dengan yang nilai FAS kecil. Hal ini disebabkan adanya rongga udara dalam beton seiring makin banyaknya kandungan air bebas dalam beton yang menyebabkan beton dengan FAS besar tidak sepadat beton dengan FAS kecil.

Intinya:

(a) Perkembangan kuat tekan beton untuk mencapai keadaan sempurna (kuat tekan 100%) pada FAS yang besar cenderung lebih lambat dari beton dengan FAS kecil, hal ini disebabkan adanya air bebas yang lebih banyak sehingga waktu ikat semen berjalan lebih lama.

(b) Kuat tekan beton pada umur yang sama dengan FAS yang besar cenderung lebih kecil dari beton dengan FAS yang kecil, hal ini disebabkan seiring besarnya kandungan air di dalam beton akan menyebabkan semakin banyaknya rongga udara di dalam beton. Sehingga beton dengan FAS kecil cenderung lebih padat dari beton dengan FAS besar.

- Dari grafik dapat dikatakan bahwa FAS yang lebih kecil dengan usia yang sama sebelum sampai ke kuat tekan karakteristik pada usia 28 hari (usia 1, 3 dan 7 hari) akan menghasilkan kuat tekan yang lebih besar dari pada FAS yang besar tetapi kuat tekan karakteristik (pada usia 28 hari) antara FAS yang kecil dan FAS yang besar akan tetap sama mencapai maksimum (100%).

Hal ini disebabkan pada FAS yang lebih besar mempunyai air bebas yang lebih banyak sehingga proses waktu ikat semen berjalan lebih lama. Tetapi keduanya baik FAS besar dan FAS kecil akan mengikat sempurna pada 28 hari.

Soal 10

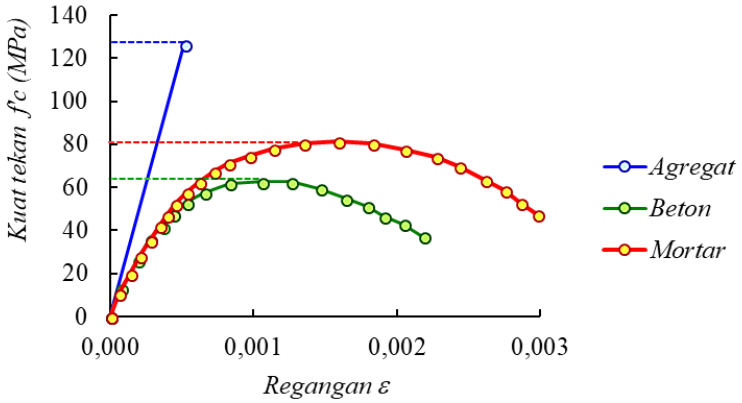
a. Apa yang dimaksud dengan *Brazillian Test*?
b. Benda uji silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm mampu menahan beban tarik belah sebesar P = 176.625 kilo Newton. Hitunglah Besarnya kuat tarik belah beton tersebut!
c. Hitunglah *Flexural Strength* balok beton berukuran 150x150x600 mm yang diuji lentur dan mengalami keruntuhan di 1/3 bentang tengah dengan beban maksimum 37.5 kN.

Penyelesaian

a. Pengujian pada contoh batuan silinder yang diletakkan secara horizontal pada mesin tekan dan ditekan hingga hancur untuk mengetahui nilai kuat tariknya.
b. f'_{tr} = (2x176625) / (3.14x300x150) = 2.5 MPa.
c. f_{MR} = (37500x450) / (150x150^2) = 5 MPa.

Soal 11

Gambar di bawah adalah diagram tegangan-regangan *(f'_c-ε)* bahan-bahan penyusun beton. Analisalah!



Gambar 8.14. Prosentase Kuat Tekan Beton dengan Bermacam – Macam

a. Perilaku bahan, apakah definisi E?
b. Apa dampak dari nilai modulus elastis E pada sebuah bahan?
c. Mengapa bahan beton yang tersusun dari agregat dan mortar mempunyai kekuatan yang lebih rendah bila dibandingkan agregat dan mortar? Jelaskan!

Penyelesaian

a. Modulus elastisitas adalah angka untuk mengukur ketahanan bahan terhadap deformasi elastis saat gaya diberikan. Modulus elastisitas dirumuskan sebagai berikut:

   $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

   E = Modulus elastisitas

   σ = Tegangan

   ε = Regangan

   Tegangan didefinisikan sebagai besarnya gaya per-satu-satuan luas, sedangkan regangan adalah perbandingan perubahan penjang terhadap panjang semula.

Agregat lebih plastis sehingga ketika mendapat kuat tekan maksimum maka akan runtuh dan tidak mempunyai kekuatan lagi, sedangkan perilaku mortar dan beton lebih elastis dimana ketika mendapat kuat tekan maksimum tidak langsung runtuh dan masih mempunyai sisa kekuatan sampai kuat tekan runtuh, kuat tekan runtuh beton selalu lebih kecil daripada kuat tekan maksimumnya.

b. Dari penjelasan nomor 1 dapat disimpulkan bahwa semakin kaku bahan maka semakin tinggi modulus elastisitasnya. Semakin kaku bahan, semakin besar gaya yang harus dikeluarkan agar benda berdeformasi maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan sehingga semakin tinggi modulus elastisitasnya.

   Bahan dengan modulus elastisitas tinggi bisa disebut plastis, semakin rendah modulus elastisitasnya maka semakin elastis bahan tersebut.

c. Agregat adalah bahan tunggal tanpa daerah lekatan dengan bahan lain sehingga kekuatan agregat paling kuat dibandingkan dengan mortar dan beton.

   Mortar adalah campuran pasta semen dan agregat halus dimana pasta semen melekat dengan agregat halus. Daerah lekatan atau yang biasa disebut interfasa itu adalah daerah terlemah yang menyebabkan mortar lemah.

   Beton adalah campuran pasta semen, agregat halus dan agregat kasar dimana interfasa dari beton lebih besar dari pada mortar sehingga pada ksasus diagram di atas beton lebih lemah dibandingkan dengan mortar.

   Daerah terlemah dalam beton adalah daerah interfasa antara agregat kasar dan pasta semen. Daerah ini akan mempunyai susunan kristal yang berbeda dengan *matrix* semen yang terletak lebih jauh dari permukaan agregat. Susunan kristal ini cenderung menghasilkan banyak rongga dan lebih lemah karena terdapat kristal-kristal besar yang mempermudah menjalarnya retakan dalam *matrix* semen. Interfasa ini mempunyai ketebalan $30\mu m - 50\mu m$, tetapi akan menjadi tempat terjadinya awal retak mikro dalam beton.

Soal 12

a. Apa yang dimaksud dengan *SCC*?
b. Apa yang dimaksud dengan rangkak?
c. Apa yang dimaksudkan dengan *Superplasticizer?*
d. Bagaimana menciptakan beton dengan mutu sesuai rencana, apa yang harus dilakukan?

Penyelesaian

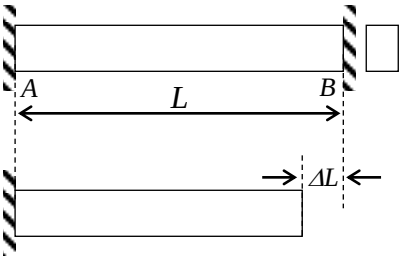
a. *SCC* (*Self Compacting Concrete*) adalah beton yang mampu mengalir sendiri yang dapat dicetak pada bekisting dengan tingkat penggunaan alat pemadat yang sangat sedikit atau bahkan tidak dipadatkan sama sekali.
b. Rangkak adalah peristiwa bertambahnya regangan pada beton akibat tegangan tekan yang cenderung tetap dan terjadi dalam waktu yang lama.
c. *Superplasticizer* adalah bahan tambahan beton yang berfungsi untuk mengurangi jumlah pemakaian air dan meningkatkan *workability* sehingga menghasilkan beton dengan kekuatan yang lebih tinggi.
d. Yang harus dilakukan agar mutu beton sesuai rencana adalah:
   - Memastikan semua komponen penyusun beton telah sesuai dengan standar yang ada.
     1) Semen
        Pastikan menggunakan jenis semen yang sesuai dengan tujuan penggunaan beton.
     2) Agregat (kasar maupun halus)
        - Agregat harus bebas dari kotoran organis.
        - Bentuk agregat harus bersudut agar mekanisme *interlock* antar agregat dapat terjadi.
        - Gradasi agregat harus bervariasi dengan komposisi yang sesuai agar dapat lebih mengisi campuran beton.
        - Dipastikan kemampuan absorbsi agregat agar kadar air untuk campuran beton dapat menyesuaikan sehingga menghindari resiko terjadi *bleeding*, dan *water film.*

3) Air
   - Jumlahnya diambil dari FAS (Faktor Air Semen).
   - Perlu diperhatikan besaran FAS sesuai dengan tujuan penggunaan beton.
   - Jumlahnya walaupun sudah sesuai FAS masih harus menyesuaikan kemampuan absorbsi agregat agar tidak terdapat air bebas dalam beton.

- Metode pembuatan (pengadukan, pencetakan) perlu diperhatikan agar tidak menyebabkan rongga udara pada campuran beton.
- Metode perawatan beton agar menjaga kondisi permukaan beton dan kandungan air beton (tidak menguap).

Soal 13

Suhu gelagar tergambar menurun 10^0C. Apabila ujung gelagar dikekang maka tentukan tegangan yang terjadi akibat susut. Diketahui, koefisien susut α_t = 10 x 10^{-6} m/m/derajat Celsius dan E_{ci} = 27.700 MPa.



Gambar 8.15. Gelagar

Perpendekan yang terjadi apabila ujung B tidak dikekang adalah ΔL.

Penyelesaian

Apabila ujung B bebas maka regangan akibat perubahan suhu menjadi:

$$\varepsilon_t = \alpha_t \Delta L = 10 \text{ x } 10^{-6} \text{ x } 10 \text{ m/m}$$

Dengan demikian, seharusnya balok memendek, tapi kekangan mengakibatkan panjang balok tetap, dan agar terjadi kesetimbangan dalam sebuah regangan sebesar ε_t akan terjadi pada ujung A dan B. Regangan ini akan mengakibatkan tegangan tarik sebesar:

$$f_t = \varepsilon_t E_{ci} = 0.0001 \text{ x } 27.700 \text{ MPa} = 2.77 \text{ Mpa}$$

Selain itu susut dan rangkak dapat mengakibatkan retak mikro, terutama bila susut dipermukaan jauh lebih besar daripada susut di dalam beton.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim, PT. Holcim Indonesia, *Proses Produksi Semen*, 2008.

Anonim, *Standar Nasional Indonesia Semen Portland SNI-2049:2015, Badan Standar Nasional*, 2015.

Maryoto, A., Gan, B.S., and Ay Lie, H., *Reduction of Chloride Ion Ingress into Reinforced Concrete using a Hydrophobic Additive Material*. Jurnal Teknologi, 79 (2), 65-72, 2017.

Neville, A.M, *Properties of Concrete*, Longman, 1993.

Sobolev, K., Nosonovsky, M., Kurpenkin, T., Flores-Vivian, I., and Rao, S., *Anti-icing and De-icing Superhydrophobic Concrete to Improve the Safety on Critical Elements on Roadway Pavements.Center for Freight and Infrastructure Research and Education, USA*, https://trid.trb.org/view.aspx/id12845413, 2013.

SKSNI S-36-1990-03. *Spesifikasi Beton Bertulang Kedap Air.* Departemen Pekerjaan Umum, Yayasan LPMP, Bandung, 1990.

SNI 2049:2015, *Standar Nasional Indonesia, Semen Portland*, Badan Standardisasi Nasional, 2015.

Profil Penulis

Dr. Eng. Agus Maryoto, ST., MT.

Lahir di Grobogan, 20 September 1971. Anak ke-5 dari 5 bersaudara dari pasangan Supardi (alm) dan Rasilah. Bapaknya Guru SD dan Ibunya tidak lulus SD mendorong untuk menimba ilmu sampai pada pendidikan formal tertinggi. Pendidikan diselesaikan di SD N1 Genuksuran (1984), SMP N1 Purwodadi (1987), SMA N3 Semarang (1990), S1 Teknik Sipil UNS (1996), S2 Teknik Sipil Undip (2004) dan S3 di bidang Material, Nagaoka University of Technology, Jepang (2013). Menjadi dosen Teknik Sipil Unsoed sejak 2005. Ketertarikannya pada perlindungan beton bertulang dari serangan korosi menginspirasinya untuk menulis buku ajar Pengantar Teknologi Beton.

Prof. Dr. Ir. Han Ay Lie, M.Eng.

Anak pertama dari tiga bersaudara dari keluarga pendidik, Han Bing Hoo, SH (alm). adalah salah satu pendiri Universitas Diponegoro. Hal ini merupakan motivasi terkuat untuk terjun ke dunia pendidikan. Memperoleh gelar guru besar pada tahun 2017 di Universitas Diponegoro, tempat mengabdi sejak 1982. Bidang beton selalu menjadi minat utama, justru karena bahan ini datang dengan kesenjangan kekuatan tarik dan tekan yang besar.

Ir. Purwanto, M.Eng.

Dilahirkan di Desa Trangkil, Kabupaten Pati, Jawa Tengah pada tanggal 11 Juli 1963. Pendidikan dari SD s/d SMA diselesaikan di Pati. S1 Teknik Sipil di UNDIP tahun 1989, S2 Jurusan Teknik Sipil konsentrasi Rekayasa Struktur di ITB tahun 1997 dan S2 di Coastal Engineering and Port Development Institute Hydraulic Engineering (IHE-UNESCO) Delft Netherland tahun 2003.

Penerbit :
CV. MARKUMI
Gondang, Candi, Ampel RT.02/RW.04
No.23 Boyolali, Kotak Pos 57352
Mobile. 08174 60004
Email. markumidotcom@gmail.com

ISBN 978-602-60701-8-0
9 786026 070180