

1 MATERIAL PENYUSUN BETON BERTULANG

A. Penyusun Beton

Beton merupakan campuran antara bahan agregat halus dan kasar dengan pasta semen (kadang-kadang juga ditambahkan *admixtures*), campuran tersebut apabila dituangkan ke dalam cetakan kemudian didiamkan akan menjadi keras seperti batuan. Proses pengerasan terjadi karena adanya reaksi kimiawi antara air dengan semen yang terus berlangsung dari waktu ke waktu, hal ini menyebabkan kekerasan beton terus bertambah sejalan dengan waktu. Beton dapat juga dipandang sebagai batuan buatan di mana adanya rongga pada partikel yang besar (agregat kasar) diisi oleh agregat halus dan rongga yang ada di antara agregat halus akan diisi oleh pasta (campuran air dengan semen) yang juga berfungsi sebagai bahan perekat sehingga semua bahan penyusun dapat menyatu menjadi massa yang padat.

Bahan penyusun beton meliputi air, semen portland, agregat kasar dan halus serta bahan tambah, di mana setiap bahan penyusun mempunyai fungsi dan pengaruh yang berbeda-beda. Sifat yang penting pada beton adalah kuat tekan, bila kuat tekan tinggi maka sifat-sifat yang lain pada umumnya juga baik. Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton terdiri dari kualitas bahan penyusun, nilai faktor air-semen, gradasi agregat, ukuran maksimum agregat, cara pengerjaan (pencampuran, pengangkutan, pematatan dan perawatan) serta umur beton (Tjokrodimuljo, 1996).

1. Semen

Semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis dengan gips sebagai bahan tambahan. Unsur utama yang terkandung dalam semen dapat digolongkan ke dalam empat bagian yaitu : trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A) dan tetrakalsium aluminoforit (C_4AF), selain itu pada semen juga terdapat unsur-unsur lainnya dalam jumlah kecil misalnya : MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O dan Na_2O . Soda atau potasium (Na_2O dan K_2O)

merupakan komponen minor dari unsur-unsur penyusun semen yang harus diperhatikan, karena keduanya merupakan alkalis yang dapat bereaksi dengan silika aktif dalam agregat sehingga menimbulkan disintegrasi beton (Neville dan Brooks, 1987).

Unsur C_3S dan C_2S merupakan bagian terbesar (70% - 80%) dan paling dominan dalam memberikan sifat semen (Tjokrodimuljo, 1996), bila semen terkena air maka C_3S akan segera berhidrasi dan memberikan pengaruh yang besar dalam proses pengerasan semen terutama sebelum mencapai umur 14 hari. Unsur C_2S bereaksi dengan air lebih lambat sehingga hanya berpengaruh setelah beton berumur 7 hari. Unsur C_3A bereaksi sangat cepat dan memberikan kekuatan setelah 24 jam, semen yang mengandung unsur C_3A lebih dari 10% akan berakibat kurang tahan terhadap sulfat. Unsur yang paling sedikit dalam semen adalah C_3AF sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan pasta semen atau beton.

Perubahan komposisi kimia semen yang dilakukan dengan cara mengubah persentase 4 komponen utama semen dapat menghasilkan beberapa jenis semen sesuai dengan tujuan pemakaiannya. Standar industri di Amerika (ASTM) maupun di Indonesia (SNI) mengenal 5 jenis semen, yaitu :

- a. Jenis I, yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus.
- b. Jenis II, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.
- c. Jenis III, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan Kekuatan awal yang tinggi setelah pengikatan terjadi.
- d. Jenis IV, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya menuntut panas hidrasi yang rendah.
- e. Jenis V, yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat yang sangat baik.

TABEL 1.1 KOMPOSISI SEMEN DAN BATASAN SNI 15-2049-2004

Semen	Persentase Komponen Penyusun							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO Bebas	MgO	Hilang Pijar
Jenis I	49	25	12	8	2,9	0,8	2,4 (≤ 6)	1,2 (≤ 5)
Jenis II	46	29	6 (≤ 8)	12	2,8	0,6	3,0 (≤ 6)	1,0 (≤ 3)
Jenis III	56	15	12 (≤ 15)	8	3,9	1,4	2,6 (≤ 6)	1,9 (≤ 3)
Jenis IV	30 (≤ 35)	46 (≥ 40)	5 (≤ 7)	13	2,9	0,3	2,7 (≤ 6)	1,0 (≤ 2,5)
Jenis V	43	36	4 (≤ 5)	12 (≤ 25)	2,7	0,4	1,6 (≤ 6)	1,0 (≤ 3)

Proses hidrasi yang terjadi pada semen portland dapat dinyatakan dalam persamaan kimia sebagai berikut :



Hasil utama dari proses hidrasi semen adalah C₃S₂H₃ (*tobermorite*) yang berbentuk gel dan panas hidrasi selama reaksi berlangsung. Hasil yang lain berupa kapur bebas Ca(OH)₂ yang merupakan sisa dari reaksi antara C₃S dan C₂S dengan air, kapur bebas ini dalam jangka panjang cenderung melemahkan beton karena dapat bereaksi dengan zat asam maupun sulfat yang ada di lingkungan sekitar sehingga menimbulkan proses korosi pada beton.

2. Air

Air merupakan bahan penyusun beton yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen, yang juga berfungsi sebagai pelumas antara butiran-butiran agregat agar dapat dikerjakan dan dipadatkan. Proses hidrasi dalam beton segar membutuhkan air kurang lebih 25% dari berat semen yang digunakan, tetapi dalam kenyataan jika nilai faktor air semen kurang dari 35% beton segar menjadi tidak dapat dikerjakan dengan sempurna sehingga setelah mengeras beton yang dihasilkan menjadi keropos dan

memiliki kekuatan yang rendah. Kelebihan air dari proses hidrasi diperlukan untuk syarat-syarat kekentalan (*consistency*) agar dapat dicapai suatu kelecakan (*workability*) yang baik. Kelebihan air ini selanjutnya akan menguap atau tertinggal di dalam beton sehingga menimbulkan pori-pori (*capillary poreous*) di dalam beton yang sudah mengeras.

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada air yang akan digunakan sebagai bahan pencampur beton meliputi kandungan lumpur maksimal 2 gr/lt, kandungan garam-garam yang dapat merusak beton maksimal 15 gr/lt, tidak mengandung khlorida lebih dari 0,5 gr/lt serta kandungan senyawa sulfat maksimal 1 gr/lt. Secara umum air dinyatakan memenuhi syarat untuk dipakai sebagai bahan pencampur beton, apabila dapat menghasilkan beton dengan kekuatan lebih dari 90% kekuatan beton yang menggunakan air suling (Tjokrodimuljo, 1996).

3. Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70% dari volume mortar atau beton. Pemilihan agregat merupakan bagian yang sangat penting karena karakteristik agregat akan sangat mempengaruhi sifat-sifat mortar atau beton (Tjokrodimuljo, 1996).

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah gradasi atau distribusi ukuran butir agregat, karena bila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang seragam berakibat volume pori lebih besar tetapi bila ukuran butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini disebabkan butir yang lebih kecil akan mengisi pori di antara butiran yang lebih besar. Agregat sebagai bahan penyusun beton diharapkan mempunyai kemampuan yang tinggi, sehingga volume pori dan bahan pengikat yang dibutuhkan lebih sedikit.

SNI 03-2834-1992 mengklasifikasikan distribusi ukuran butiran agregat halus menjadi empat daerah atau zone yaitu : zone I (kasar), zone II (agak kasar), zone III (agak halus) dan zone IV (halus) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.2 dan distribusi agregat kasar yang ditunjukkan pada Tabel 1.3.

TABEL 1.2 BATAS-BATAS GRADASI AGREGAT HALUS MENURUT SNI 03-2834-1992

Ukuran Saringan	Persentase Berat yang Lolos Saringan			
	Gradasi Zone I	Gradasi Zone II	Gradasi Zone III	Gradasi Zone IV
9,60 mm	100	100	100	100
4,80 mm	90-100	90-100	90-100	95-100
2,40 mm	60-95	75-100	85-100	95-100
1,20 mm	30-70	55-90	75-100	90-100
0,60 mm	15-34	35-59	60-79	80-100
0,30 mm	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15 mm	0-10	0-10	0-10	0-15

TABEL 1.3 BATAS-BATAS GRADASI AGREGAT KASAR

Ukuran Saringan	Persentase Berat yang Lolos Saringan	
	5 mm sampai 38 mm	5 mm sampai 18 mm
38,0 mm	90-100	100
19,0 mm	35-70	90-100
9,6 mm	10-40	50-85
4,8 mm	0-5	0-10

Ukuran agregat dalam prakteknya secara umum digolongkan ke dalam 3 kelompok yaitu :

- a. Batu, jika ukuran butiran lebih dari 40 mm.
- b. Kerikil, jika ukuran butiran antara 5 mm sampai 40 mm.
- c. Pasir, jika ukuran butiran antara 0,15 mm sampai 5 mm.

Butiran yang lebih kecil dari 0,15 mm dinamakan "silt" atau tanah (Tjokrodimuljo, 1996).

Agregat kasar menurut Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia perlu diuji ketahanannya terhadap keausan (dengan mesin *Los Angeles*). Persyaratan mengenai ketahanan agregat kasar beton terhadap keausan ditunjukkan pada Tabel

1.4.

TABEL 1.4 PERSYARATAN KEKERASAN AGREGAT KASAR

Kekuatan Beton	Maksimum bagian yang hancur dengan Mesin Los Angeles, Lolos Ayakan 1,7 mm (%)
Kelas I (sampai 10 MPa)	50
Kelas II (10MPa-20MPa)	40
Kelas III (di atas 20 MPa)	27

Berkaitan dengan pekerjaan konstruksi beton bertulang, ukuran maksimum nominal agregat kasar harus tidak melebihi:

- a. 1/5 jarak terkecil antara sisi-sisi cetakan, ataupun
- b. 1/3 ketebalan pelat lantai, ataupun
- c. 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan-tulangan atau kawat-kawat, bundel tulangan, atau tendon-tendon pratekan atau selongsong-selongsong.

4. Bahan tambah

Bahan tambah yaitu bahan selain unsur pokok pada beton (air, semen dan agregat) yang ditambahkan pada adukan beton, baik sebelum, segera atau selama pengadukan beton dengan tujuan mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton sewaktu masih dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Fungsi-fungsi bahan tambah antara lain: mempercepat pengerasan, menambah kelecakan (*workability*) beton segar, menambah kuat tekan beton, meningkatkan daktilitas atau mengurangi sifat getas beton, mengurangi retak-retak pengerasan dan sebagainya. Bahan tambah diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit dengan pengawasan yang ketat agar tidak berlebihan yang berakibat memperburuk sifat beton (Tjokodimuljo, 1996). Bahan tambah menurut maksud penggunaannya dibagi menjadi dua golongan yaitu *admixtures* dan *additives*.

Admixtures ialah semua bahan penyusun beton selain air, semen hidrolik dan agregat yang ditambahkan sebelum, segera atau selama proses pencampuran adukan di dalam *batching*, untuk merubah sifat beton baik dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Definisi *additive* lebih mengarah pada semua bahan yang ditambahkan dan digiling bersamaan pada saat proses produksi semen (Taylor, 1997).

Menurut Tjokrodimuljo (1996), bahan tambah dapat dibedakan menjadi 3 golongan, yaitu :

- a. *Chemical Admixtures* merupakan bahan tambah bersifat kimiawi yang dicampurkan pada adukan beton dengan maksud agar diperoleh sifat-sifat yang berbeda pada beton dalam keadaan segar maupun setelah mengeras, misalnya sifat pengerjaannya yang lebih mudah dan waktu pengikatan yang lebih lambat atau lebih cepat. *Superplasticizer* merupakan salah satu jenis *chemical admixture* yang sering ditambahkan pada beton segar. Pada dasarnya penambahan *superplasticizer* dimaksudkan untuk meningkatkan kelecakan, mengurangi jumlah air yang diperlukan dalam pencampuran (faktor air semen), mengurangi *slump loss*, mencegah timbulnya *bleeding* dan segregasi, menambah kadar udara (*air content*) serta memperlambat waktu pengikatan (*setting time*).
- b. Pozolan (*pozzolan*) merupakan bahan tambah yang berasal dari alam atau buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur-unsur silikat dan aluminat yang reaktif. Pozolan sendiri tidak mempunyai sifat semen, tetapi dalam keadaan halus bereaksi dengan kapur bebas dan air menjadi suatu massa padat yang tidak larut dalam air. Pozolan dapat ditambahkan pada campuran adukan beton atau mortar (sampai batas tertentu dapat menggantikan semen), untuk memperbaiki kelecakan (*workability*), membuat beton menjadi lebih kedap air (mengurangi permeabilitas) dan menambah ketahanan beton atau mortar terhadap serangan bahan kimia yang bersifat agresif. Penambahan pozolan juga dapat meningkatkan kuat tekan beton karena adanya reaksi pengikatan kapur bebas (Ca(OH)_2) oleh silikat atau aluminat menjadi *tobermorite* ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Pozolan yang saat ini telah banyak diteliti dan digunakan antara lain *silica fume*, *fly ash*, tras alam dan abu sekam padi (*Rice Husk Ash*).
- c. Serat (*fibre*) merupakan bahan tambah yang berupa asbestos, gelas /kaca, plastik, baja atau serat tumbuh-tumbuhan (rami, ijuk). Penambahan serat ini dimaksudkan untuk meningkatkan kuat tarik, menambah ketahanan terhadap retak, meningkatkan daktilitas dan ketahanan beton terhadap beban kejut (*impact load*) sehingga dapat meningkatkan keawetan/durabilitas beton, misalnya pada

perkerasan jalan raya atau lapangan udara, *spillway* serta pada bagian struktur beton yang tipis untuk mencegah timbulnya keretakan.

B. Ketentuan Rancang Campur Menurut SNI 03-2847-2002

Proporsi material untuk beton harus ditentukan untuk menghasilkan sifat-sifat: (1) kelecakan dan konsistensi yang menjadikan beton mudah dicor ke dalam cetakan atau ke celah di sekeliling tulangan dengan berbagai kondisi pelaksanaan pengecoran yang harus dilakukan, tanpa terjadi segregasi atau *bleeding* yang berlebih, (2) tahanan terhadap pengaruh lingkungan yang agresif, (3) memenuhi persyaratan uji kekuatan sehingga harus dirancang untuk menghasilkan kuat tekan rata-rata perlu dengan memperhitungkan kuat tekan karakteristik yang ingin dicapai dan nilai deviasi standar yang berkaitan dengan sebaran hasil uji kuat tekan.

1. Deviasi standar

- a. Nilai deviasi standar dapat diperoleh jika fasilitas produksi beton telah mempunyai catatan hasil uji. Data hasil pengujian yang dijadikan sebagai dasar perhitungan deviasi standar harus:
 - 1) Mewakili jenis material, prosedur pengendalian mutu dan kondisi yang serupa dengan yang diharapkan, dan perubahan-perubahan pada material ataupun proporsi campuran yang dimiliki oleh data pengujian tidak perlu lebih ketat dari yang digunakan pada pekerjaan yang akan dilakukan.
 - 2) Mewakili beton yang diperlukan untuk memenuhi kekuatan yang disyaratkan atau kuat tekan f'_c pada kisaran 7 MPa dari yang ditentukan untuk pekerjaan yang akan dilakukan.
 - 3) Terdiri dari sekurang-kurangnya 30 contoh pengujian berurutan atau dua kelompok pengujian berurutan yang jumlahnya sekurang-kurangnya 30 contoh pengujian.
- b. Jika fasilitas produksi beton tidak mempunyai catatan hasil uji yang memenuhi syarat diatas, tetapi mempunyai catatan uji dari pengujian sebanyak 15 sampai dengan 29 contoh secara berurutan, maka deviasi standar ditentukan sebagai hasil perkalian antara nilai deviasi standar yang dihitung dan faktor modifikasi pada Tabel 1.5.

TABEL 1.5 FAKTOR MODIFIKASI DEVIASI STANDAR

Jumlah pengujian	Faktor modifikasi untuk deviasi standar
Kurang dari 15 contoh	Gunakan Tabel 1.6
15 contoh	1,16
20 contoh	1,08
25 contoh	1,03
30 contoh atau lebih	1,00

2. Kuat rata-rata perlu

- a. Kuat tekan rata-rata perlu f'_{cr} yang digunakan sebagai dasar pemilihan proporsi campuran beton harus diambil sebagai nilai terbesar dari Pers. (1-1) atau (1-2) yang menggunakan nilai deviasi standar yang dihitung sesuai dengan Tabel 1.5 atau 1.6.

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34s \quad (1-1)$$

atau

$$f'_{cr} = f'_c + 2,33s - 3,5 \quad (1-2)$$

- b. Bila fasilitas produksi beton tidak mempunyai catatan hasil uji lapangan untuk perhitungan deviasi standar yang memenuhi ketentuan, maka kuat rata-rata perlu f'_{cr} harus ditetapkan berdasarkan Tabel 1.6.

TABEL 1.6 KUAT TEKAN RATA-RATA PERLU JIKA DATA TIDAK TERSEDIA UNTUK MENETAPKAN DEVIASI STANDAR

Persyaratan kuat tekan, f'_c , MPa	Kuat tekan rata-rata perlu, f'_{cr} , MPa
Kurang dari 21 MPa	$f'_c + 7,0$
21 s/d 35	$f'_c + 8.5$
Lebih dari 35	$f'_c + 10.0$

3. Perancangan campuran tanpa berdasarkan data lapangan atau campuran percobaan

- a. Jika data yang disyaratkan tidak tersedia, maka proporsi campuran beton harus ditentukan berdasarkan percobaan atau informasi lainnya, bilamana hal tersebut disetujui oleh Pengawas Lapangan. Kuat tekan rata-rata perlu, f'_{cr} , beton yang dihasilkan dengan bahan yang mirip dengan yang akan digunakan

harus sekurang-kurangnya 8,5 MPa lebih besar daripada kuat tekan f'_c yang disyaratkan. Alternatif ini tidak boleh digunakan untuk pengujian kuat tekan yang disyaratkan lebih besar dari 28 MPa.

- b. Campuran beton yang dirancang menurut butir ini harus memenuhi persyaratan keawetan dan kriteria pengujian kuat tekan.

C. Karakteristik Beton

Beton keras dapat dikategorikan berkualitas baik jika mempunyai sifat-sifat kuat, awet, kedap air dan memiliki kemungkinan perubahan dimensi yang kecil.

1. Kuat tekan beton

Kuat tekan beton merupakan parameter utama yang harus diketahui dan dapat memberikan gambaran tentang sifat-sifat mekanis yang lain pada beton tersebut. Secara umum kekuatan beton dipengaruhi oleh kekuatan komponen-komponennya yaitu; pasta semen, rongga, agregat dan *interface* antara pasta semen dengan agregat. Dalam pelaksanaannya faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton adalah nilai faktor air semen, derajat kepadatan, umur beton, jenis semen, jumlah semen dan kualitas agregat yang meliputi gradasi, tekstur permukaan, bentuk, kekuatan, kekakuan serta ukuran maksimum agregat.

Pengujian kuat tekan beton dilakukan menurut SNI: 03-1974-1990, menggunakan benda uji silinder berukuran tinggi 30 cm dengan diameter 15 cm. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil uji kuat tekan beton meliputi; kondisi ujung benda uji, ukuran benda uji, rasio diameter benda uji terhadap ukuran maksimum agregat, rasio panjang terhadap diameter benda uji, kondisi kelembaban dan suhu benda uji, arah pembebanan terhadap arah pengecoran, laju penambahan beban pada *compression testing machine* serta bentuk geometri benda uji.

Apabila dalam uji kuat tekan beton digunakan benda uji berbentuk kubus dengan ukuran masing-masing sisi 15 cm, maka harus dilakukan konversi untuk memperoleh f'_c dengan Persamaan (1-3):

$$f'_c = \left\{ 0,76 + 0,2^{10} \log \left(\frac{f_{ck}}{15} \right) \right\} \cdot f_{ck} \quad (1-3)$$

dimana:

f'_c = kuat tekan silinder beton (MPa)

f_{ck} = kuat tekan kubus beton (MPa)

Penentuan nilai f'_c harus didasarkan pada pengujian beton yang telah berumur 28 hari. Dalam hal pengendalian mutu, kuat tekan suatu mutu beton dapat dikategorikan memenuhi syarat jika dua hal berikut dipenuhi:

- a. Setiap nilai rata-rata dari tiga uji kuat tekan yang berurutan mempunyai nilai yang sama atau lebih besar dari f'_c .
- b. Tidak ada nilai uji kuat yang dihitung sebagai nilai rata-rata dari dua hasil uji contoh silinder mempunyai nilai dibawah f'_c lebih dari 3,5 MPa.

Jika salah satu dari persyaratan diatas tidak terpenuhi, maka harus diambil langkah-langkah untuk meningkatkan hasil uji kuat tekan rata-rata pada pengecoran beton berikutnya.

2. Kuat tarik beton

Kekuatan tarik beton merupakan salah satu sifat mekanik yang dapat diukur secara langsung dengan cara *direct tensile method*. Dalam pelaksanaannya, pengujian dengan metode ini akan mengalami kesulitan dalam pemasangan benda uji untuk mendapatkan beban aksial tarik murni, selain itu juga akan menimbulkan adanya tegangan tambahan yang tidak tentu besarnya. Mengingat kedua alasan diatas, maka penggunaan metode ini sangat jarang digunakan. Pengujian kekuatan tarik lebih banyak dilakukan dengan metode kuat tarik belah dan kuat tarik lentur. Pada umumnya rasio kuat tarik belah beton normal dibandingkan dengan kuat tekannya hanya berkisar 10%, sedangkan rasio kuat lentur dibandingkan dengan kuat tekan beton normal berkisar 15%.

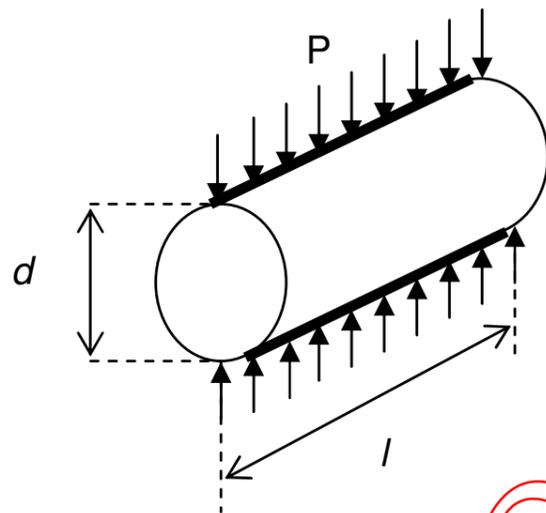
a. Pengujian kuat tarik belah

Metode pengujian yang sering digunakan mengacu pada ASTM C496-90, dengan benda uji berupa silinder dengan diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm.

Besaran kuat tarik belah dihitung dengan Persamaan (1-4).

$$\text{Kuat tarik} = \frac{2.P}{\pi.l.d} \text{ MPa} \quad (1-4)$$

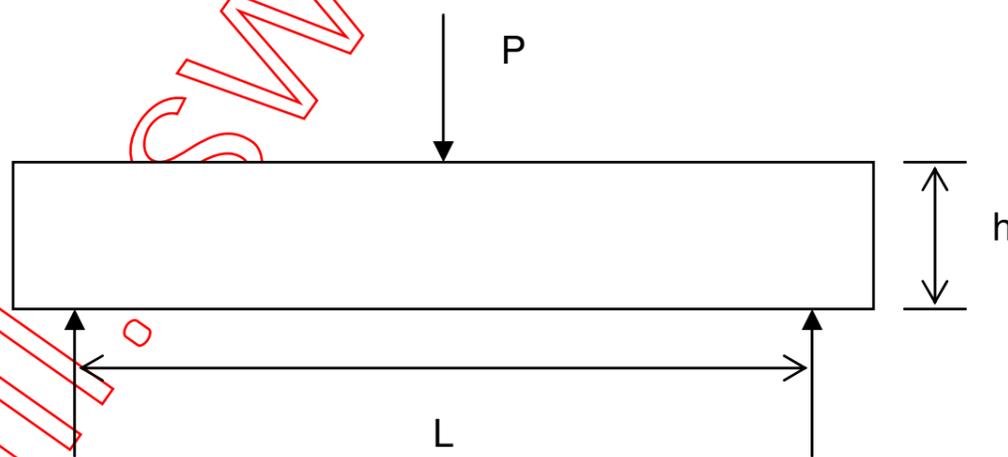
dimana; P = beban maksimum (kN)
 l = panjang benda uji (mm)
 d = diameter benda uji (mm)



Gambar 1-1 Pengujian Kuat Tarik Belah

b. Pengujian kuat lentur beton

Cara pengujian yang sering digunakan adalah metode pembebanan tiga titik (*three point bending*) mengacu pada standar ASTM C293-79, benda uji yang digunakan berupa balok dengan ukuran 150 mm x 150 mm x 750 mm. Besaran tegangan tarik (*modulus of rupture*) dapat dihitung dengan Persamaan (1-5).



Gambar 1-2 Metode Pengujian *Three Point Bending*

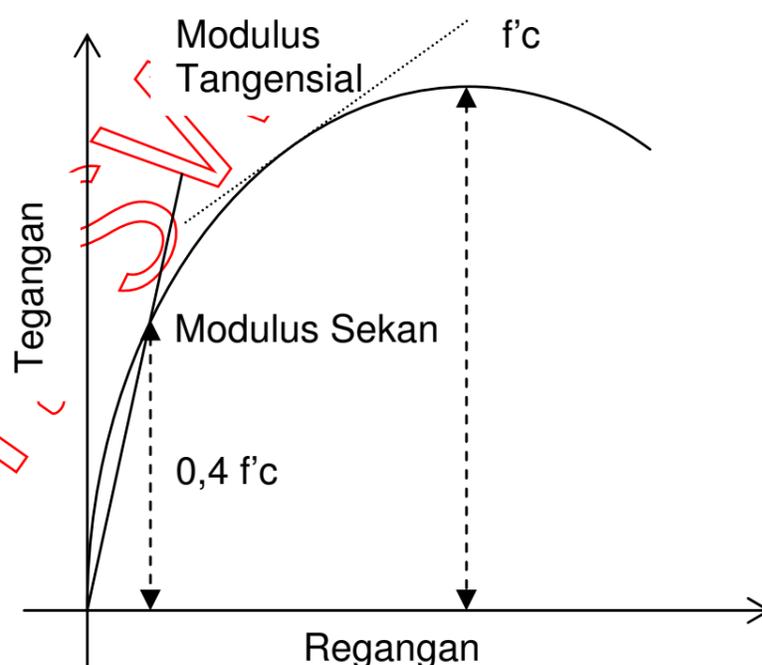
$$R = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \text{ MPa} \quad (1-5)$$

dimana; R = modulus rupture

- P = beban maksimum (kN)
 L = panjang benda uji (mm)
 b = lebar penampang benda uji (mm)
 h = tinggi penampang benda uji (mm)

3. Modulus elastisitas beton

Diagram hubungan tegangan-regangan dalam pengujian kuat tekan beton berbentuk kurvilinear. Pada taraf pembebanan yang sangat awal, maka modulus elastisitas Young hanya dapat diterapkan pada tangen dari kurva di titik asal. Kemiringan awal dari tangen pada kurva didefinisikan sebagai modulus tangen awal, dan modulus tangensial di titik lain pada kurva juga dapat ditentukan dengan cara yang sama. Kemiringan garis lurus yang menghubungkan titik asal dengan tegangan tertentu (sekitar $0,4 f'c$) merupakan nilai modulus sekan beton, nilai inilah yang selanjutnya disebut sebagai *modulus elastisitas* dalam perencanaan konstruksi beton, dianggap memenuhi asumsi praktis bahwa regangan yang terjadi selama pembebanan pada dasarnya dianggap elastis (dapat sepenuhnya pulih kembali jika semua beban dihilangkan), dan bahwa regangan selanjutnya akibat bekerjanya beban disebut sebagai rangkak beton.



Gambar 1-3 Diagram Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Besaran modulus elastisitas pada beton dapat dihitung menurut ketentuan ASTM C 469-94, yang juga disebut sebagai *modulus chord* atau *elastisitas chord* (E_c), menggunakan Persamaan (1-6)

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \text{ MPa} \quad (1-6)$$

- dimana; E_c = Modulus Elastisitas (MPa)
 S_2 = Tegangan sebesar 0,4 f'_c
 S_1 = Tegangan yang bersesuaian dengan regangan longitudinal sebesar 0,00005
 ε_2 = Regangan longitudinal akibat tegangan S_2

Nilai modulus elastisitas beton juga dapat dihitung dengan persamaan empiris yang telah disepakati dalam SNI 03-2847-2002

- a. Untuk nilai w_c (berat jenis beton) antara 1.500 dan 2.500 kg/m^3 , nilai modulus elastisitas beton E_c dapat diambil sebesar

$$(w_c)^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \text{ (dalam MPa)} \quad (1-7)$$

- b. Untuk beton normal E_c dapat diambil sebesar

$$4700 \sqrt{f'_c} \quad (1-8)$$

4. Kuat geser

Kuat geser merupakan sifat mekanik beton yang lebih sulit untuk ditentukan secara eksperimental dibandingkan dengan pengujian-pengujian lain yang telah dibahas di atas. Hal ini disebabkan sulitnya mengisolasi tegangan geser dari tegangan-tegangan lainnya. Ini merupakan alasan utama munculnya variasi yang sangat besar atas besaran nilai geser yang dilaporkan dalam berbagai hasil penelitian, dengan kisaran 20 persen kuat tekan pada pembebanan normal hingga persentase yang sangat besar (sampai 85 persen) dari kuat tekan pada kasus-kasus dimana geser langsung terjadi bersamaan dengan aksial tekan. Kontrol desain struktural jarang sekali didasarkan pada kuat geser karena tegangan geser harus dibatasi secara kontinu pada nilai yang lebih kecil untuk mencegah beton mengalami tarik diagonal.

5. Susut

Susut didefinisikan sebagai regangan yang bergantung pada waktu akibat hilangnya kelembaban pada kondisi besaran temperatur yang tetap, tidak ada beban luar yang bekerja pada elemen struktur tersebut, dan terjadi setelah proses pengerasan beton. Penyebab utama terjadinya fenomena ini adalah hilangnya kandungan air dalam beton akibat evaporasi. Kandungan air yang dimaksud dalam proses hidrasi semen atau beton adalah air bebas yang berada dalam pori kapiler, air yang diserap secara fisis pada permukaan gel *Calcium-Silicate-Hydrate*, dan air yang terikat secara kimiawi selama hidrasi semen.

Perubahan volume pada proses pengeringan pasta semen tidak selalu sama dengan volume air yang dipindahkan, hilangnya air yang berada pada pori beton terjadi terlebih dahulu. Fenomena ini hanya menyebabkan susut beton yang sangat kecil dan bahkan dapat diabaikan. Air yang diserap pasta semen akan menguap seiring dengan proses pengeringan beton. Perubahan volume pada semen yang tidak terkekang besarnya hampir sama dengan volume air yang menguap dalam setiap ketebalan molekul air di atas permukaan gel, karena ketebalan molekul air berkisar 1% dari ukuran partikel gel maka perubahan volume pasta semen yang terjadi sampai selesainya proses pengeringan diperkirakan sebesar 1%, meskipun yang dapat terukur melalui uji eksperimental hanya berkisar 0,4%. Fenomena susut pada beton sangat dipengaruhi oleh rasio agregat-semen dan nilai faktor air semen yang digunakan. Semakin besar rasio agregat-semen yang digunakan menyebabkan semakin kecil besaran susut pada beton, sedangkan semakin besar nilai faktor air semen berakibat semakin besar pula fenomena susut yang terjadi, demikian pula penambahan *superplasticizer* pada adukan beton cenderung meningkatkan susut pada beton akibat meningkatnya volume air di permukaan pasta semen.

TABEL 1-7 PENGARUH NILAI FAKTOR AIR SEMEN DAN RASIO AGREGAT-SEMEN TERHADAP SUSUT BETON (LEA, 1970)

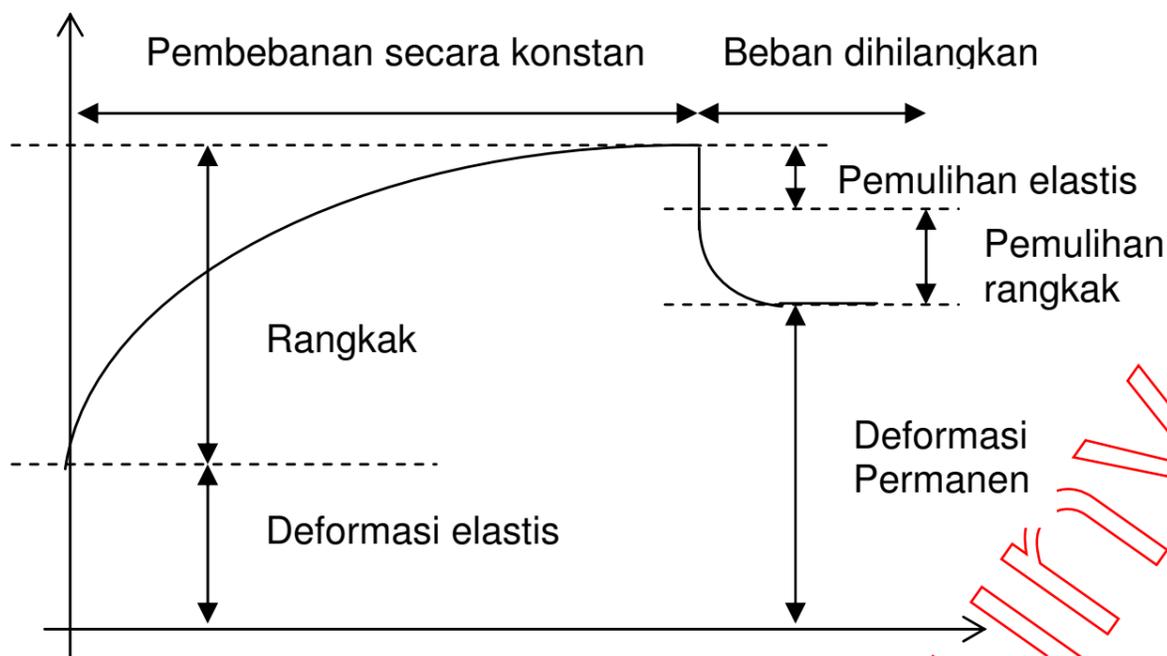
Rasio agregat-semen	Susut beton setelah 6 bulan ($\times 10^{-6}$)			
	Nilai faktor air semen			
	0,40	0,50	0,60	0,70
3	800	1200	-	-
5	400	600	750	850
7	200	300	400	500

Sumber: Gani, 1997

Susunan tulangan pada elemen beton bertulang juga memberikan pengaruh terhadap fenomena susut pada beton. Semakin banyak jumlah tulangan maka akan semakin kecil besaran susut yang terjadi.

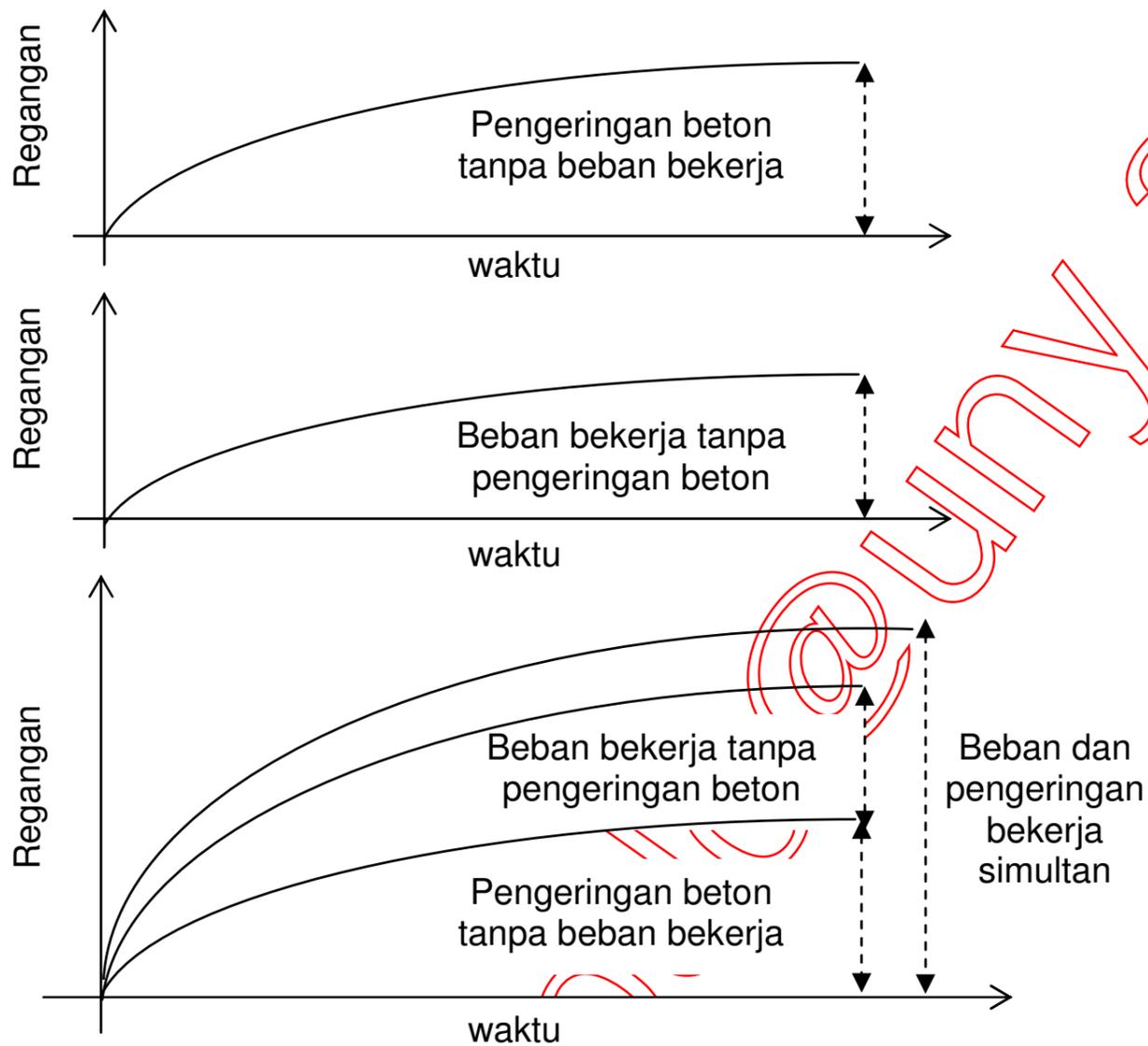
6. Rangkak

Rangkak adalah bertambahnya regangan seiring dengan berjalannya waktu akibat bekerjanya beban secara terus-menerus. Deformasi awal akibat bekerjanya beban dikenal sebagai regangan elastis, sedangkan regangan tambahan yang muncul tanpa adanya penambahan besaran beban disebut sebagai rangkak. Beton yang dikondisikan dengan bekerjanya gaya tekan secara terus-menerus akan menyebabkan terjadinya fenomena rangkak. Bertambahnya besaran rangkak cenderung berbanding lurus dengan besarnya tegangan yang bekerja pada kisaran 0,2 sampai 0,5 f'c, hal ini disebabkan karena retak-retak mikro yang banyak muncul pada kisaran tegangan 0,4 f'c. Semakin cepat suatu elemen dikenai beban kerja setelah beton mengeras dapat meningkatkan besaran rangkak yang terjadi. Rangkak pada beton terkait erat dengan gerakan air yang terserap secara fisis di dalam partikel gel sehingga sangat dipengaruhi komposisi adukan beton, terutama faktor air semen dan rasio agregat-semen. Semakin besar nilai faktor air semen berakibat meningkatnya rangkak beton, sedangkan semakin besar rasio agregat-semen dapat memperkecil besaran rangkak akibat adanya efek kekangan agregat.



Gambar 1-4 Kurva Rangkak Beton Akibat Tegangan Aksial Tekan

Pada kondisi normal pengukuran besaran rangkak sangat sulit dipisahkan dengan fenomena susut pada beton karena kedua fenomena ini berlangsung secara simultan. Dalam hal ini, perbedaan utama antara rangkak dengan susut adalah pada proses susut terkait dengan evaporasi air dalam gel ke atmosfer, sedangkan rangkak dipengaruhi gerakan air di dalam beton itu sendiri. Berbagai hasil pengujian menunjukkan bahwa besaran regangan yang terukur cenderung lebih besar dari hasil penjumlahan regangan akibat rangkak dan susut yang diukur secara terpisah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1-5.



Gambar 1-5 Regangan Saat Beban Bekerja Secara Simultan dengan Proses Pengeringan Beton

D. Tulangan

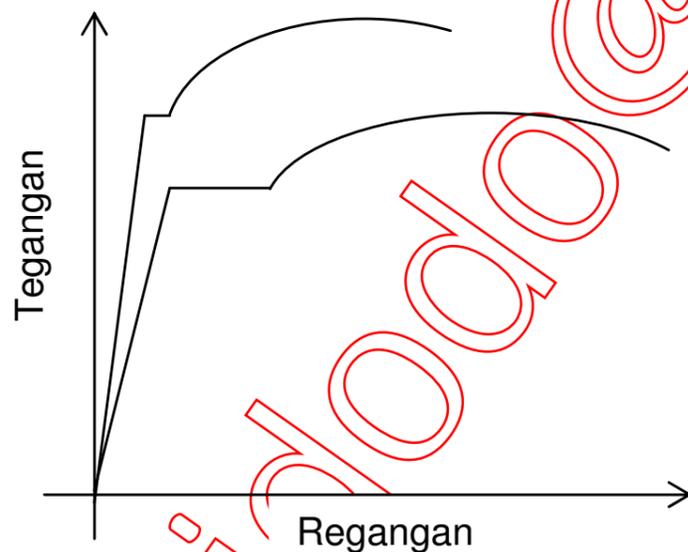
Dalam perencanaan struktur beton bertulang, beton diasumsikan tidak memiliki kekuatan tarik sehingga diperlukan material lain untuk menanggung gaya tarik yang bekerja. Material yang dilekatkan pada beton umumnya berbentuk batang dan disebut sebagai tulangan. Sampai saat ini baja merupakan jenis material yang paling banyak digunakan sebagai tulangan meskipun telah dikembangkan penggunaan *fibre-reinforced polymer* sebagai bahan alternatif.

1. karakteristik baja tulangan

Penulangan baja untuk beton dapat terdiri atas batang, kawat, dan jalinan kawat, dengan karakteristik utama meliputi: (1) modulus elastisitas Young (E_s), (2)

kuat leleh (f_y), (3) kuat *ultimate* (f_u), (4) notasi mutu baja, dan (5) bentuk permukaan dan diameter tulangan.

Baja yang digunakan sebagai tulangan memiliki karakteristik yang sangat bervariasi, mulai baja dengan karbon rendah (kandungan karbon kurang dari 0,25% berat baja), baja dengan kandungan karbon sedang (0,25% sampai 0,60%), dan baja dengan kandungan karbon tinggi (lebih dari 0,60% berat baja). Pada umumnya semakin tinggi kandungan karbon dalam baja maka akan semakin tinggi mutu baja namun juga berakibat baja menjadi lebih getas. Diagram tegangan-regangan baja yang digunakan sebagai acuan perencanaan struktur beton bertulang diperoleh dari hasil uji tarik baja secara monoton.



Gambar 1-6 Diagram Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Diagram diawali bentuk kurva linear dalam kondisi elastis sampai dicapai kondisi leleh dimana terjadi peningkatan regangan tanpa adanya penambahan gaya tarik, dilanjutkan fase *strain-hardening* dimana tegangan dan regangan meningkat bersamaan secara non-linear sampai tegangan *ultimate* kemudian kembali terjadi pengurangan tegangan hingga tegangan putus. Tegangan yang terjadi pada fase leleh diacu sebagai kuat leleh baja yang sangat berpengaruh dalam perencanaan beton bertulang. SNI 03-2847-2002 menyebutkan modulus elastisitas untuk tulangan non-pratekan E_s boleh diambil sebesar 200.000 MPa.

Spesifikasi teknis baja tulangan yang beredar di pasaran Indonesia diatur dalam SII 0136-80, sebagaimana ditunjukkan Tabel 1-8 dan 1-9.

TABEL 1-8 Notasi dan Kualitas Baja Tulangan Menurut SII 0136-80

Jenis	Kelas	Simbol	Tegangan leleh minimum MPa (kgf/cm ²)	Tegangan <i>ultimate</i> minimum MPa (kgf/cm ²)
Polos	1	BJTP24	235 (2400)	382 (3900)
	2	BJTP30	294 (3000)	480 (4900)
Ulir	1	BJTD24	235 (2400)	382 (3900)
	2	BJTD30	294 (3000)	480 (4900)
	3	BJTD35	343 (3500)	490 (5000)
	4	BJTD40	392 (4000)	559 (5700)
	5	BJTD50	490 (5000)	610 (6300)

Catatan: Baja tulangan dengan kuat leleh melebihi 400 MPa boleh digunakan, selama f_y adalah tegangan pada regangan 0,35 %.

Demi efisiensi transfer beban dari beton ke tulangan, kekuatan lekat antara tulangan dengan beton di sekelilingnya merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Kuat lekat tulangan ini muncul akibat adanya gesekan dan adhesi antara beton dengan tulangan, selain itu kuat lekat juga sangat dipengaruhi oleh kualitas beton, kelecakan beton segar, arah pengecoran, susut beton, bentuk permukaan tulangan, sifat mekanik tulangan dan posisi dimana dilakukan pemasangan tulangan.

Untuk meningkatkan kekuatan lekat antara tulangan dengan beton di sekelilingnya telah dikembangkan jenis tulangan dengan uliran pada permukaan tulangan, yang selanjutnya disebut sebagai baja tulangan deform atau ulir. Dalam SNI 03-2847-2002 disebutkan bahwa dalam perencanaan struktur beton bertulang untuk bangunan gedung, baja tulangan yang digunakan harus tulangan ulir kecuali baja polos diperkenankan untuk tulangan spiral atau tendon.

TABEL 1-9 Dimensi dan Berat Baja Tulangan Menurut SII 0136-80

Tulangan baja		Diameter nominal (mm)	Luas nominal (mm ²)	Berat nominal (kg/m)
Polos	Deform			
P6	D6	6,00	28,3	0,222
P8	D8	8,00	50,3	0,395
P9	D9	9,00	63,6	0,499
P10	D10	10,00	78,5	0,617
P12	D12	12,00	113,1	0,888
P13	D13	13,00	132,7	1,040
P14	D14	14,00	154,0	1,210
P16	D16	16,00	201,1	1,580
P18	D18	18,00	254,5	2,000
P19	D19	19,00	283,5	2,230
P20	D20	20,00	314,2	2,470
P22	D22	22,00	380,1	2,980
P25	D25	25,00	490,9	3,850
P28	D28	28,00	615,7	4,830
P32	D29	29,00	660,5	5,190
	D32	32,00	804,3	6,310
	D36	36,00	1017,9	7,990
	D40	40,00	1256,5	9,870
	D50	50,00	1963,5	15,400

2. Ketentuan pemasangan baja tulangan

Untuk menjamin ketahanan baja tulangan dari bahaya korosi, maka SNI 03-2847-2002 juga memberikan batasan tebal selimut beton minimum sebagaimana disajikan pada Tabel 1-10.

TABEL 1-10 BATASAN TEBAL MINIMUM SELIMUT BETON MENURUT SNI 03-2847-2002

Kondisi Struktur	Tebal selimut min (mm)
(a) Beton yang dicor langsung di atas tanah dan selalu berhubungan dengan tanah	70
(b) Beton yang berhubungan dengan tanah atau cuaca:	
▪ batang D-19 hingga D-56	50
▪ batang D-16, jaring kawat polos P16 atau ulir D16 dan yang lebih kecil	40

-
- (c) Beton yang tidak langsung berhubungan dengan cuaca atau tanah:

Pelat, dinding, pelat berusuk:

- | | |
|------------------------------------|----|
| ▪ batang D-44 dan D-56 | 40 |
| ▪ batang D-36 dan yang lebih kecil | 20 |

Balok, kolom:

- | | |
|--|----|
| ▪ tulangan utama, pengikat, sengkang, lilitan spiral | 40 |
|--|----|

Komponen struktur cangkang, pelat lipat:

- | | |
|--|----|
| ▪ batang D-19 dan yang lebih besar | 20 |
| ▪ batang D-16, jaring kawat polos P16 atau ulir D16 dan yang lebih kecil | 15 |
-

SNI 03-2847-2002 memberikan ketentuan spasi penulangan sebagai berikut:

- a. Jarak bersih antara tulangan sejajar dalam lapis yang sama, tidak boleh kurang dari d_b ataupun 25 mm, dan disesuaikan dengan ketentuan ukuran maksimum agregat.
- b. Bila tulangan sejajar tersebut diletakkan dalam dua lapis atau lebih, tulangan pada lapis atas harus diletakkan tepat di atas tulangan di bawahnya dengan spasi bersih antar lapisan minimal 25 mm.
- c. Pada komponen struktur tekan yang diperkuat dengan tulangan spiral atau sengkang pengikat, jarak bersih antar tulangan longitudinal tidak boleh kurang dari $1,5d_b$ ataupun 40 mm.
- d. Pembatasan jarak bersih antar batang tulangan ini juga berlaku untuk jarak bersih antara suatu sambungan lewatan dengan sambungan lewatan lainnya atau batang tulangan yang berdekatan.
- e. Pada dinding dan pelat lantai, selain konstruksi pelat rusuk, tulangan lentur utama harus berjarak tidak lebih dari tiga kali tebal dinding atau pelat lantai, ataupun 500 mm.
- f. Bundel tulangan
 - 1) Kumpulan tulangan sejajar yang diikat dalam satu bundel agar bekerja dalam satu kesatuan maksimal terdiri dari empat tulangan per bundel.
 - 2) Bundel tulangan harus diletakkan di dalam sengkang atau pengikat.
 - 3) Pada balok, tulangan yang lebih besar dari D-36 tidak boleh dibundel.

- 4) Masing-masing batang tulangan yang terdapat dalam satu bundel tulangan yang berakhir dalam bentang komponen struktur lentur harus diakhiri pada titik-titik yang berlainan, paling sedikit dengan jarak $40d_b$ secara berselang.
- 5) Jika pembatasan jarak dan selimut beton minimum didasarkan pada diameter tulangan d_b , maka satu unit bundel tulangan harus diperhitungkan sebagai tulangan tunggal dengan diameter yang didapat dari luas ekuivalen penampang gabungan.

E-mail: Swidodo@unh.ac.id