

BAB III LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian Beton

Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi sejumlah material pembentuknya. Material pembentuk tersebut berupa agregat halus dan agregat kasar yaitu pasir, batu, batu pecah atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan secukupnya bahan perekat semen Portland, dan air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung.

Nilai kuat tekan beton relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tariknya, dan beton merupakan bahan yang bersifat getas. Kuat tarik yang dimiliki beton hanya berkisar antara 9-15% dari kuat tekannya (Dipohusodo, 1994) karenanya sering kali dalam perencanaan kuat tarik beton dianggap sama dengan nol. Dengan menambahkan baja tulangan pada daerah tarik pada beton, maka kelemahan tarik beton dapat ditanggung oleh baja tulangan yang memiliki kuat tarik yang lebih besar.

Kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f_c dengan satuan N/mm^2 atau Mpa (Mega Pascal). Kuat tekan beton berumur 28 hari berkisar antara \pm 10-65 Mpa. Untuk struktur beton bertulang umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan berkisar 17-30 Mpa, sedangkan untuk beton prategang digunakan beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi, berkisar antara 30-45 Mpa. Untuk keadaan dan keperluan struktur khusus, beton ready mix sanggup mencapai kuat tekan 62 Mpa.

3.2 Material Penyusun Beton

3.2.1 Semen Portland

Semen Portland terutama mengandung kalsium, dan alumina silica dibuat dari bahan utama *limestone* yang mengandung kalsium oksida (CaO), dan lempung yang

mengandung silica dioksida (SiO_2) serta aluminium oksida (Al_2O_3). Setelah melalui suatu proses industri, semen dipasarkan dalam bentuk bubuk dan dikemas dalam kantung.

Semen berfungsi sebagai bahan perekat untuk menyatukan bahan agregat kasar dan agregat halus menjadi satu massa yang kompak dan padat dengan proses hidrasi. Semen akan berfungsi sebagai perekat apabila diberi air, sehingga semen tergolong bahan pengikat hidrolis.

Kekuatan semen merupakan hasil dari proses hidrasi. Proses kimiawi ini berupa rekristalisasi dalam bentuk *interlocking-crystals* sehingga membentuk gel semen yang akan mempunyai kekuatan tekan tinggi apabila mengeras. Table 3.1 memperlihatkan kontribusi relatif masing-masing komponen semen dalam mencapai kekuatannya. Kekuatan awal semen *portland* semakin tinggi apabila semakin banyak persentase C_3S . Jika perawatan kelembaban terus berlangsung, kekuatan akhirnya akan lebih besar apabila persentase C_2S semakin besar. C_3A mempunyai kontribusi terhadap kekuatan selama beberapa hari sesudah pengecoran beton karena bahan ini yang terdahulu mengalami hidrasi.

Tabel 3.1 Sifat-sifat semen

Komponen	Kelajuan reaksi	Pelepasan panas	Besar penyemenan batas
Trikalsium silikat C_3S	Sedang	Sedang	Baik
Dikalsium silikat C_2S	Lambat	Kecil	Baik
Trikalsium aluminat C_3A	Cepat	Besar	Buruk
Tetrakalsium aluminoferrat C_4AF	Lambat	Kecil	Buruk

Sumber : Beton Bertulang, Edward G. Nawy (1990)

Jika semen *portland* dicampur dengan air, maka komponen kapur dilepaskan dari senyawanya. Banyaknya kapur yang dilepaskan ini sekitar 20% dari berat semen. Kondisi terburuknya ialah mungkin terjadi pemisahan struktur yang disebabkan oleh lepasnya kapur dari semen. Situasi ini harus dicegah dengan menambahkan pada semen suatu mineral silica seperti pozolan. Mineral yang ditambahkan bereaksi dengan kapur bila ada uap membentuk bahan yang kuat, yaitu kalsium silikat.

Zat kapur adalah proporsi terbesar dalam pembentukan semen sehingga berperan menentukan sifat semen. Kelebihan zat kapur berdampak kurang baik untuk semen, serta menyebabkan disintegrasi (perpecahan) semen setelah timbul ikatan. Kadar kapur yang tinggi tapi tidak berlebihan cenderung memperlambat perkerasan tetapi menghasilkan kekuatan awal yang tinggi. Kekurangan kapur menghasilkan semen yang lemah dan bilamana kurang sempurna pembakarannya, menyebabkan ikatan yang cepat.

Karena berbagai jenis semen menghasilkan panas yang berbeda-beda, juga dengan kelajuan pelepasan panas yang berbeda, maka sangat perlu diketahui untuk struktur apakah semen tersebut digunakan. Semakin besar dan berat penampang struktur beton, semakin sedikit panas hidrasi yang diinginkan.

Adapun jenis-jenis semen *portland* adalah sebagai berikut:

1. Semen jenis I : Semen *portland* untuk penggunaan umum untuk semua tujuan.
2. Semen jenis II : Relatif sedikit pelepasan panas; digunakan untuk struktur besar.
3. Semen jenis III : Mencapai kekuatan tinggi pada umur 3 hari.
4. Semen jenis IV : Dipakai pada bendungan beton, karena mempunyai sifat panas hidrasi rendah.
5. Semen jenis V : Dipakai untuk beton-beton yang akan ditempatkan di lingkungan dengan konsentrasi sulfat yang tinggi.

3.2.2 Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Pada beton biasanya terdapat sekitar 60%-80% volume agregat. Agregat ini harus beradasi sedemikian rupa sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh, homogen, dan rapat, dimana agregat yang berukuran kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada diantara agregat yang berukuran besar. Bentuk, tekstur, dan gradasi agregat mempengaruhi sifat pengikatan dan pengerasan beton segar. Untuk mencapai kuat beton baik perlu diperhatikan kepadatan dan kekerasan massanya, karena umumnya semakin padat dan keras massa agregat akan semakin tinggi kekuatan dan *durability*-nya (daya tahan terhadap penurunan mutu akibat pengaruh cuaca). Sedangkan sifat fisik, kimia, dan mineral mempengaruhi kekuatan, kekerasan dan ketahanan dari beton, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian yang penting dalam pembuatan beton.

Maksud penggunaan agregat di dalam campuran beton ialah:

1. Menghemat penggunaan semen *portland*.
2. Menghasilkan beton dengan kekuatan besar.
3. Mengurangi penyusutan pada pengerasan beton.
4. Dengan gradasi agregat yang baik dapat tercapai beton padat.
5. Sifat mudah dikerjakan (*wokabilitas*) dapat diperiksa pada adukan beton dengan gradasi yang baik.

Karena agregat merupakan bahan yang terbanyak di dalam beton, maka semakin banyak persentase agregat dalam campuran akan semakin murah harga beton, dengan syarat campurannya masih cukup mudah dikerjakan untuk elemen struktur yang memakai beton tersebut (Edward G. Nawy, 1990). Sifat yang terpenting dari agregat adalah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan, yang mempunyai pengaruh terhadap ikatan dengan pasta semen, porositas, dan karakteristik penyerapan air yang mempengaruhi daya tahan terhadap proses pembekuan pada musim dingin, dan ketahanan terhadap penyusutan. Berdasarkan

ukuran butiran, agregat dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu agregat halus dan agregat kasar.

a. Agregat Halus

Merupakan agregat isi yang berupa pasir alam hasil disintegrasi alami dari batu-batuan (*natural sand*) atau berupa pasir buatan yang dihasilkan dari alat-alat pemecah batuan (*artificial sand*) dengan ukuran kecil (0,15-5 mm). Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No. 200, atau bahan-bahan lain yang dapat merusak beton.

Persyaratan gradasi agregat halus dapat dilihat dalam tabel 3.2 berikut ini:

Tabel 3.2 Persyaratan gradasi agregat halus ASTM C 33-74a

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos (%)
9,50	100
4,75	95-100
2,36	80-100
1,18	55-85
0,60	25-60
0,30	10-30
0,15	2-10

Sumber : Bahan dan Praktek Beton, Murdock & Brook (1979)

b. Agregat Kasar

Agregat kasar didefinisikan sebagai butiran yang tertahan saringan 4,75 mm (No.4 standart / SMI). Agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca, dan efek-efek perusak lainnya. Agregat kasar harus bersih dari bahan-bahan organik dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan gel semen. Agregat kasar sebagai bahan campuran untuk membentuk beton dapat berupa kerikil atau batu pecah.

Persyaratan gradasi untuk agregat kasar dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut ini:

Tabel 3.3 Persyaratan gradasi agregat kasar ASTM C 33-74a

Ukuran saringan (mm)	Persentase lolos (%)
25	95-100
19	-
12.5	25-60
9.5	-
4.75	0-10
2,36	0-5

Sumber : Bahan dan Praktek Beton Murdock & Brook (1979)

3.2.3 Air

Air diperlukan pada pembuatan beton agar terjadi reaksi kimia dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah pengerjaannya, umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton (Nawy, 1990).

Di dalam campuran beton, air mempunyai dua fungsi, yang pertama, untuk memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan, dan kedua, sebagai pelincir campuran kerikil, pasir dan semen agar memudahkan percetakan.

Proporsi air yang sedikit akan memberikan kekuatan yang tinggi pada beton, tetapi lemasan beton atau daya kerjanya akan berkurang yang di akibatkan karena proses hidrasi tidak seluruhnya selesai. Sedangkan proporsi air yang berlebihan akan memberikan kemudahan pada waktu pelaksanaan pencampuran, tetapi kekuatan hancur beton menjadi rendah dikarenakan banyaknya gelembung air yang terbentuk. Proporsi air ini dinyatakan dalam rasio air-semen, yaitu angka yang menyatakan perbandingan antar berat air dibagi dengan berat semen dalam adukan beton tersebut, pada umumnya dipakai 0,4-0.6 tergantung mutu beton yang hendak dicapai. Beton

yang paling padat dan kuat diperoleh dengan menggunakan jumlah air yang minimal konsisten dan derajat workabilitas yang maksimal.

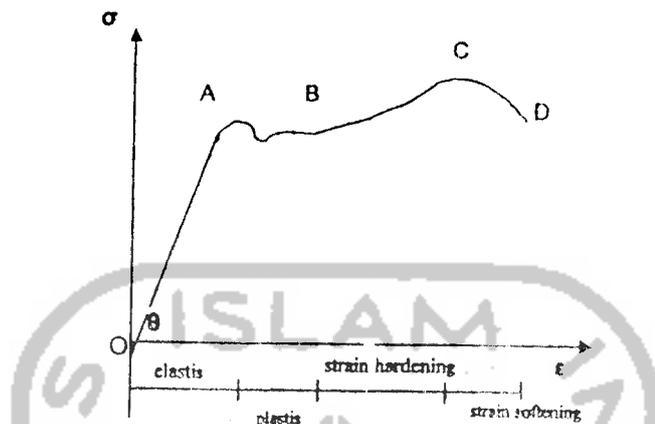
Air yang digunakan harus memenuhi persyaratan kualitas air sebagai berikut (Kardiyono, 1992):

1. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

3.3 Baja Tulangan

Mengingat beton kuat menahan tekan dan lemah dalam menahan tarik, maka dalam penggunaannya sebagai komponen struktur bangunan, umumnya beton diperkuat dengan tulangan yang mampu menahan gaya tarik. Untuk keperluan penulangan tersebut digunakan bahan baja yang memiliki sifat teknis menguntungkan, dan baja tulangan yang digunakan dapat berupa batang baja lonjoran ataupun kawat rangkaian las (*wire mesh*) yang berupa batang kawat baja yang dirangkai dengan teknik pengelasan.

Di dalam setiap struktur beton bertulang, harus diusahakan supaya tulangan baja dan beton dapat mengalami deformasi secara bersamaan, dengan maksud agar tidak terjadi penggelinciran diantara keduanya. Ada dua jenis baja tulangan yaitu, baja tulangan polos dan baja tulangan ulir (*deformed*). Baja tulangan ulir berfungsi untuk menambah lekatan antara beton dengan baja. Baja tulangan ulir yaitu batang tulangan baja yang permukaannya dikasarkan secara khusus, diberi sirip teratur dengan pola tertentu atau batang tulangan yang dipilin pada proses produksinya.



Gambar 3.1 Diagram tegangan regangan hasil uji tarik (Paulay, 1975)

Garis O-A menunjukkan fase elastis, pada fase ini hubungan antara tegangan dan regangan adalah berbanding lurus (linier). Titik A disebut batas proporsional, tegangan di titik A disebut tegangan proporsional yang nilainya sangat dekat dengan tegangan leleh (f_y). Gradien kemiringan yang dibentuk oleh garis O-A menunjukkan modulus elastisitas (E) yang dikenal juga sebagai *young modulus*. Garis A-B menunjukkan keadaan plastis yang merupakan garis yang relatif lurus mendatar, dimana tegangan yang terjadi relatif konstan sedangkan regangannya terus bertambah. Setelah melampaui titik B tegangan dan regangan meningkat kembali dan mencapai tegangan maksimum di titik C. Pada titik C disebut tegangan ultimit (kuat tarik baja) dengan nilai tegangan berbeda tergantung mutu bajanya. Fase B-C disebut pergeseran regangan (*strain hardening*). Setelah melampaui titik C, penampang baja mengalami penyempitan (*necking*) yang mengakibatkan tegangan menurun dan akhirnya baja putus di D dengan nilai regangan yang berbeda tergantung mutu bajanya. Fase C-D disebut pelunakan regangan (*strain softening*).

3.4 Sifat-sifat Beton

3.4.1 Sifat-sifat Beton Segar

a. Mudah dikerjakan (*workability*)

Tingkat kemudahan adukan beton ditunjukkan pada saat beton diaduk, diangkut, dituang, dan dipadatkan tanpa mengurangi homogenitas beton, dan beton tidak terurai (*bleeding*) yang berlebihan untuk mencapai kekuatan yang direncanakan. Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat kemudahan dikerjakan antara lain:

1. Penambahan semen ke dalam campuran juga memudahkan cara pengerjaan adukan beton, karena diikuti dengan bertambahnya air campuran untuk memperoleh nilai fas yang tetap.
2. Pemakaian butir-butir batuan yang bulat mempermudah cara pengerjaan beton.
3. Jumlah air yang dipakai dalam campuran beton. Makin banyak air yang dipakai makin mudah beton segar dikerjakan.
4. Gradasi campuran pasir dan kerikil. Apabila mengikuti gradasi campuran yang telah disarankan oleh peraturan, maka adukan beton akan mudah dikerjakan.
5. Cara pemadatan adukan beton. Bila dilakukan dengan alat getar, maka diperlukan tingkat kelecakan (*keenceran*) yang berbeda.

Yang sangat mempengaruhi kemudahan beton untuk dikerjakan adalah banyaknya air yang terkandung dalam campuran. Tingkat kemudahan pengerjaan berkaitan erat dengan tingkat kelecakan (*keenceran*) adukan beton. Untuk mengetahui tingkat kelecakan, adukan beton biasanya dilakukan dengan percobaan *slump*. Makin besar nilai *slump* berarti adukan beton semakin encer dan ini berarti semakin mudah dikerjakan, tetapi keenceran yang berlebihan akan mengurangi mutu beton karena banyaknya rongga-rongga udara yang terjadi sehingga beton menjadi *porous*. Pada umumnya nilai *slump* berkisar antara 5 – 12.5 cm.

b. Pemisahan Kerikil (*segregation*)

Segregation adalah terpisahnya agregat kasar dari campuran adukan beton, yang disebabkan oleh kelebihan air pada Campuran beton. Dimana terjadi pengendapan partikel yang berat ke dasar beton segar dan partikel-partikel yang lebih ringan akan menuju ke permukaan beton segar. Hal-hal tersebut akan mengakibatkan beberapa keadaan pada beton yaitu terdapat rongga-rongga udara, beton menjadi tidak homogen dan permeabilitas serta keawetan berkurang.

c. Pemisahan Air (*bleeding*)

Kecerendungan campuran untuk naik ke atas (memisahkan diri) pada beton segar yang baru saja dipadatkan disebut *bleeding*. Hal ini disebabkan ketidakmampuan bahan selia dalam campuran untuk menahan seluruh air campuran ketika bahan itu bergerak ke bawah.

Air naik ke atas sambil membawa semen dan butir-butir halus pasir, yang pada akhirnya setelah beton mengeras akan tampak sebagai selaput. Lapisan ini dikenal sebagai *laitance*. *Bleeding* biasanya terjadi pada campuran beton basah (kelebihan air) atau campuran adukan beton dengan nilai *slump* tinggi.

3.4.2 Sifat-sifat Beton Setelah Mengeras

Sifat mekanis beton keras dapat diklarifikasikan sebagai sifat jangka pendek atau sesaat dan sifat jangka panjang. Sifat jangka pendek adalah kekuatan tekan, tarik, geser, dan kekakuan yang diukur dengan modulus elastinya. Sedangkan sifat jangka panjang dapat diklarifikasikan dalam rangkai dan susut.

a. Kekuatan (*strength*)

Kekuatan beton meliputi kekuatan tekan, kekuatan tarik dan kekuatan geser. Yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah faktor air semen (*fas*). semakin kecil *fas* semakin tinggi kuat tekan beton. Kekuatan beton semakin meningkat dengan bertambahnya umur.

b. Ketahanan

Beton dikatakan mempunyai ketahanan yang baik apabila bertahan lama dalam kondisi tertentu tanpa mengalami kerusakan selama bertahun-tahun. Kondisi yang dapat mengurangi daya tahan beton dapat disebabkan faktor dari luar dan dari dalam beton itu sendiri. Faktor luar antara lain cuaca, suhu yang ekstrem, erosi, kembang dan susut akibat basah atau kering yang silih berganti dan pengaruh bahan kimia. Faktor dari dalam yaitu reaksi agregat dengan senyawa alkali.

c. Rangkak dan Susut

Rangkak (*creep*) atau *lateral material flow* adalah penambahan regangan terhadap waktu akibat adanya beban yang bekerja. Deformasi awal akibat beban adalah *regangan elastis*, sedangkan regangan tambahan akibat beban yang sama disebut regangan rangkak. Rangkak dipengaruhi oleh umur beton, regangan, faktor air semen, dan kekuatan beton.

Ada dua jenis susut: susut plastis dan susut pengeringan. Susut plastis terjadi beberapa jam setelah beton dituang ke dalam acuan. Permukaan yang diekspos seperti plat lantai akan lebih mudah dipengaruhi oleh udara kering karena adanya bidang kontak yang luas. Dengan demikian terjadi penguapan yang lebih cepat melalui permukaan beton dibandingkan dengan pergantian oleh air dari lapisan beton yang lebih bawah. Susut pengeringan adalah berkurangnya volume elemen beton jika terjadi kehilangan uap air karena penguapan. Hal-hal yang mempengaruhi susut antara lain mutu agregat dan faktor air semen. Pada umumnya proses rangkak selalu dihubungkan dengan susut karena keduanya terjadi bersamaan dan seringkali memberi pengaruh yang sama, yaitu deformasi yang bertambah sesuai dengan bertambahnya waktu.

3.5 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton diwakili oleh perbandingan kuat tekan maksimum dengan luas tampang silinder beton dengan satuan N/mm^2 . Kuat tekan beton ditentukan oleh perbandingan semen, agregat halus, agregat kasar, air dan berbagai campuran lainnya. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama dalam menentukan kuat tekan beton.

Besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Jenis semen dan kualitasnya, mempengaruhi kuat tekan rata-rata dan kuat batas beton.
2. Jenis dan tekstur bidang permukaan agregat.
3. Perawatan beton harus diperhatikan, sebab kehilangan kekuatan akibat pengeringan sebelum waktunya adalah sekitar 40%.
4. Suhu mempengaruhi kecepatan pengerasan
5. Umur, pada keadaan normal kekuatan beton bertambah dengan umurnya. Kecepatan bertambahnya kekuatan, bergantung pada jenis semen yang digunakan, misal semen dengan almina yang tinggi akan menghasilkan beton dengan kuat hancur pada umur 24 jam sama dengan semen *portland* biasa umur 28 hari. Pengerasan berlangsung terus seiring dengan penambahan umur beton.

3.6 Zat perekat *epoxy*

Meningkatkan kekuatan lekatan antara tulangan dan beton merupakan salah satu faktor mempengaruhi kekuatan tarik tulangan pada struktur beton bertulang, sedangkan tulangan yang dipasang pada beton dilakukan setelah beton menjadi keras, maka perlu suatu zat untuk melekatkan antara baja tulangan dengan beton. Zat yang digunakan tersebut adalah zat *epoxy* yang bagus sebagai perekat dan coating. Hal ini dikarenakan:

1. Rekatan ke berbagai jenis permukaan bagus.
2. Curing tanpa hasil samping yang berbahaya.
3. Curing suhu rendah dan sedang.
4. Pengerutan kecil.
5. Tahan goresan.

Dalam penelitian ini digunakan zat perekat jenis Sikadur 31 CF Normal yang diperoleh dari PT Sika Indonesia. Kuat lekat (*bond strength*) Epoxy jenis ini mencapai 15 N/mm^2 setelah 3 hari pemberian epoxy pada suhu 23°C terhadap beton yang berumur 28 hari.

Keunggulan penggunaan Sikadur 31 CF Normal adalah:

1. Mudah dalam penggunaannya.
2. Cocok digunakan pada permukaan beton yang kering.
3. Adhesi terhadap elemen struktur baik.
4. Lengket terhadap material konstruksi sehingga mempunyai kekuatan lekat yang tinggi.
5. Tanpa menggunakan bahan pelarut.
6. Tidak ada penyusutan ketika mengeras.
7. Kedap air dan cairan lain.

Persiapan yang dilakukan sebelum pemberian Sikadur 31 CF Normal adalah beton dan baja tulangan harus bersih tanpa ada partikel-partikel lepas seperti pasir, minyak, dll.

3.7 Tegangan Lekat

Kuat lekat adalah kemampuan baja tulangan dan beton yang menyelimutinya dalam menahan gaya-gaya dari luar ataupun faktor lain yang dapat menyebabkan lepasnya lekatan antara baja tulangan dan beton (Winter, 1993).

Menurut Nawy (1986), kuat lekatan antara baja tulangan dan beton yang bergantung pada faktor-faktor utama sebagai berikut:

1. Adhesi antara elemen beton dan bahan penguatnya (tulangan baja).
2. Efek *gripping* (memegang) sebagai akibat dari susut pengeringan beton disekeliling tulangan, dan saling geser antara tulangan dengan beton di sekelilingnya.
3. Tahanan gesek (friksi) terhadap gelincir dan saling mengunci pada saat elemen penguat atau tulangan mengalami tarik.
4. Efek kualitas beton dan kekuatan tarik dan tekannya.
5. Efek mekanis penjangkaran ujung tulangan.
6. Diameter dan bentuk tulangan.

Kuat lekat antara baja tulangan dengan beton merupakan susunan yang khas dan kompleks dari adhesi, tahanan geser, dan aksi penguncian mekanis dari perubahan permukaan baja tulangan. Ini mempunyai pengaruh penting pada keretakan dan perubahan bentuk bahan struktur bertulang.

Kekuatan lekatan tergantung pada besarnya perikatan baja tulangan di dalam beton. Kuat lekat yang rendah dapat menimbulkan selip sehingga adhesi hilang. Maka, pergeseran antara tulangan dengan beton sekelilingnya hanya di tahan oleh gesekan disepanjang daerah selip.

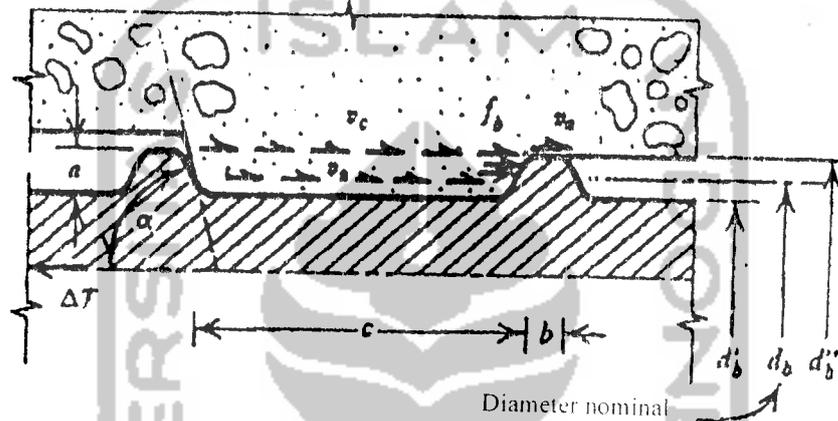
Menurut Kemp (1986), distribusi tegangan lekat sepanjang tulangan ulir lebih rumit dan kompleks. Tegangan lekat antara batang tulangan dan beton akan terjadi pada dua tonjolan. Baja ulir dapat meningkatkan kapasitas lekatan karena penguncian dua ulir dan beton di sekelilingnya. Gaya tarik yang ditahan oleh tulangan dipindahkan ke beton melalui tonjolan. Tegangan lekat yang terjadi diantara dua ulir adalah gabungan dari beberapa tegangan dibawah ini:

1. Tegangan lekat yang dihasilkan dari adhesi di sepanjang permukaan baja tulangan.
2. Tegangan lekat permukaan.

3. Tegangan lekat yang bekerja di permukaan beton silinder yang berbatasan dengan baja tulangan ulir.

Hubungan antara tegangan dan gaya dapat dilihat dari rumus:

$$\Delta T = \pi \cdot d'_b \cdot (b+c) \cdot v_a + \pi \frac{d_b'^2 - d_b'^2}{4} f_b \approx \pi \cdot d_b' \cdot c \cdot v_c \dots \dots \dots (3.1)$$

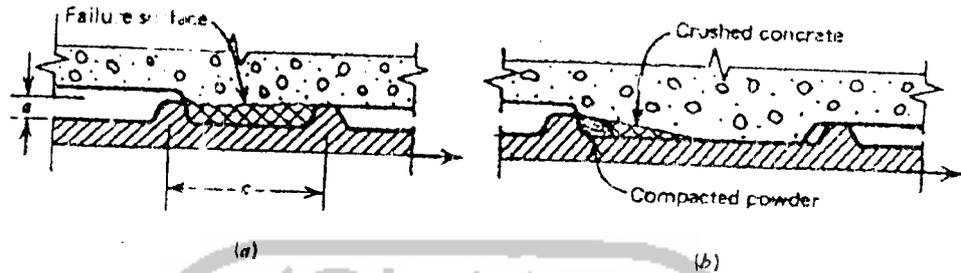


Gambar 3.2 Tegangan pada baja tulangan ulir (R. Park and T. Paulay, 1974)

Tegangan lekat yang dihasilkan dari adhesi di sepanjang permukaan baja tulangan sangat kecil dibandingkan dengan tegangan lekat permukaan yang mengelilingi ulir. Oleh karena itu, v_a dapat diabaikan untuk tujuan praktis. Hubungan antara dua komponen penting tegangan lekat, f_b dan v_c dapat disederhanakan sebagai berikut :

1. Karena $b \approx 0,1 c$
2. Karena $a \approx 0,05 d_b'$, luas permukaan dari salah satu ulir adalah :

$$\pi \frac{d_b'^2 - d_b'^2}{4} \approx \pi \cdot d_b' \cdot a \dots \dots \dots (3.2)$$



Gambar 3.3 Mekanisme kerusakan antara baja tulangan ulir dan beton (R. Park and T. Paulay, 1974)

Keterangan gambar:

1. Untuk gambar 3.3 (a) → $a/c > 0,15$
2. Untuk gambar 3.3 (b) → $a/c < 0,10$

Dari Gambar 3.3 didapat rumus:

$$\Delta T = \pi \cdot d_b \cdot a \cdot f_b \approx \pi \cdot d_b \cdot c \cdot v_c \tag{3.3}$$

Maka :

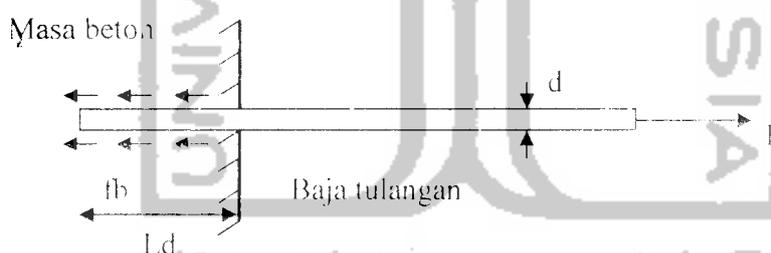
$$v_c \approx \frac{a}{c} f_b \tag{3.4}$$

Dengan :

- ΔT = Beban.
- a = Jarak antara puncak ulir dengan tulangan.
- b = Lebar puncak ulir.
- c = Jarak antar ulir.
- d_b = Diameter nominal.
- d'_b = Diameter dalam.
- d''_b = Diameter luar.
- f_b = Tegangan lekat/kuat lekat permukaan.
- v_c = Tegangan lekat/kuat lekat disepanjang permukaan baja.
- v_c = Tegangan lekat/kuat lekat baja tulangan ulir dan beton.

3.8 Panjang Penyaluran

Panjang penyaluran adalah panjang penanaman yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan baja hingga mencapai tegangan luluh, merupakan fungsi dari tegangan leleh, diameter dan tegangan lekat baja tulangan. Panjang penyaluran menentukan tahanan terhadap tergelincirnya tulangan. Dasar utama teori panjang penyaluran adalah dengan memperhitungkan suatu baja tulangan yang ditanam di dalam masa beton. Agar batang dapat menyalurkan gaya sepenuhnya melalui ikatan, harus tertanam di dalam beton hingga suatu kedalaman tertentu yang dinyatakan dengan panjang penyaluran. Sebuah gaya tarik P bekerja pada baja tulangan tersebut. Gaya ini ditahan oleh lekatan antara beton sekeliling dengan baja tulangan. Bila tegangan lekat ini bekerja merata pada seluruh bagian batang yang tertanam, total gaya anker (gaya yang harus dilawan sebelum batang tersebut keluar dari beton) akan sama dengan panjang bagian yang tertanam dikalikan keliling baja tulangan kali tegangan lekat. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Panjang penyaluran baja tulangan

Gaya maksimum yang dapat dilawan oleh batang itu sendiri sama dengan luas penampang batang dikalikan dengan kekuatan tarik baja. Agar terjadi keseimbangan antara gaya, maka kedua gaya ini harus sama besar. Untuk menjamin lekatan antara baja tulangan dan beton tidak mengalami kegagalan, diperlukan adanya syarat panjang penyaluran.

$$Ld \cdot \pi \cdot d \cdot fb = P \dots \dots \dots (3.5)$$

Dimana nilai $P = A \cdot f_y$ maka didapat persamaan :

$$L_d \cdot \pi \cdot d \cdot f_b = A \cdot f_y \dots\dots\dots(3.6)$$

Dengan luas penampang tulangan adalah $A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$

$$L_d \cdot \pi \cdot d \cdot f_b = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot f_y \dots\dots\dots(3.7)$$

Dari persamaan 7 diperoleh panjang penyaluran :

$$L_d = \frac{f_y}{4 f_b} \cdot d \dots\dots\dots(3.8)$$

Dan nilai tegangan lekat :

$$f_b = \frac{f_y}{4 L_d} \cdot d \dots\dots\dots(3.9)$$

dengan :

- P = Gaya tarik keluar.
- A = Luas penampang baja tulangan.
- f_y = Tegangan baja leleh.
- d = Diameter baja tulangan.
- L_d = panjang penyaluran.
- f_b = kuat lekat/tegangan lekat.

Menurut SKSNI T-15-1991-03 pasal 3.5.2 menentukan bahwa panjang penyaluran L_d untuk batang tulanga baja tarik deformasian dan tulangan rangkai las adalah sebagai berikut :

$$L_d = L_{db} \times \text{faktor modifikasi} \dots\dots\dots(3.10)$$

Dengan :

- L_d = panjang penyaluran
- L_{db} = panjang penyaluran dasar

a. Panjang penyaluran dasar :

1. Batang D-36 dan lebih kecil : $0,02 A_b f_y / \sqrt{f'_c}$
Tetapi tidak kurang dari : $0,06 d_b f_y$
2. Batang D-45 : $25 f_y / \sqrt{f'_c}$
3. Batang D-55 : $40 f_y / \sqrt{f'_c}$
4. Kawat berulir : $3/8 d_b \cdot f_y / \sqrt{f'_c}$

b. Faktor modifikasi diambil :

1. Tulangan atas : 1,4
2. Tulangan dengan $f_y > 400$ Mpa : $2 - (400/f_y)$
3. Beton ringan dengan spesifikasi beton tahan sulfat : $\sqrt{f'_c} / (1,8f_{ct})$
4. Beton ringan tanpa menentukan kekuatan tarik
Beton ringan berpasir : 1,18
Beton ringan total : 1,33
5. Penulangan mendatar spasi pkp 150 mm,
Jarak bersih antara tulangan < 70 mm : 0,80
6. Tulangan dalam lilitan spiral diameter > 5 mm
Dan jarak lilitan < 100 mm : 0,75

Panjang penyaluran L_d tidak boleh kurang dari 300 mm.

f_c = Satuan dalam MPa.

f_y = Satuan dalam Mpa.

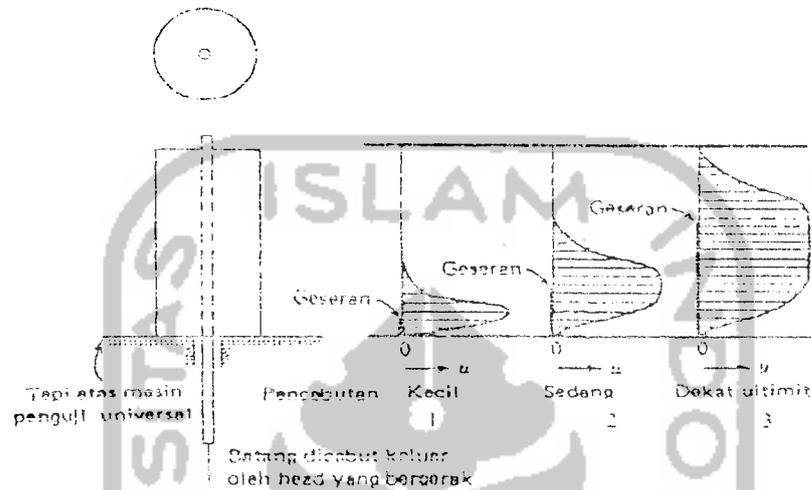
d_b = Satuan dalam mm.

A_b = Satuan dalam mm^2 .

f_{ct} = Satuan dalam MPa.

Panjang penyaluran L_d yang didapat dalam satuan milimeter (mm).

Dengan : ΔL = Pertambahan panjang baja
 P = Beban
 L_0 = Panjang mula-mula baja
 E = Modulus young
 A = Luas penampang baja



Gambar 3.6 Rambatan Sesar dan Tegangan Lekat Pada Pengujian Pull-out (Ferguson, 1986)

Dalam gambar 3.6 diperlihatkan rambatan sesar dan tegangan lekat pada pengujian lolos tarik. Dari gambar tersebut tampak bahwa sesar antara baja tulangan dengan beton merambat dari ujung yang dibebani ke bagian ujung yang tidak dibebani.

Pada tahap awal pemberian beban tarik, tegangan lekat timbul pada ujung yang dibebani karena pada bagian tersebut terlebih dahulu telah terjadi sesar. Kemudian sesar secara beransur-ansur tegangan merambat menuju ujung tulangan yang tidak dibebani seiring dengan pertambahan beban.

3.9 Distribusi Tegangan Lekat pada Pengujian Lolos Tarik

Tegangan lekat yang diijinkan sebagian besar ditetapkan dari pengujian lolos tarik (*pull-out test*). Sesar batang relatif terhadap beton diukur pada ujung yang dibebani dan ujung bebas. Pada beban relatif kecil, sesar mula-mula terjadi pada daerah sekitar ujung yang dibebani. Makin besar gaya tarik yang dikerjakan, sesar pada ujung dibebani makin bertambah besar. Apabila sesar telah mencapai ujung bebas, maka perlawanan maksimum hampir tercapai. Perlawanan rata-rata selalu dihitung seakan-akan merata sepanjang penyaluran (Ferguson, 1986).

Adapun tegangan lekat kritis didefinisikan sebagai nilai terkecil dari tegangan lekat yang menghasilkan sesar sebesar 0,05 mm pada ujung bebas atau 0,25 mm pada ujung yang dibebani (Park dan Paulay, 1975).



Gambar 3.5 Sesar antara baja tulangan dan beton

Dari Gambar 3.5 dapat dirumuskan bahwa sesar (Δ_c) yang terjadi setelah pembeban adalah:

$$\Delta_c = \Delta - \Delta_s \dots\dots\dots(3.11)$$

- Dengan :
- Δ_c = sesar yang terjadi
 - Δ = pertambahan panjang total
 - Δ_s = pertambahan panjang baja

Pertambahan panjang baja dicari dengan rumus :

$$\Delta_s = \frac{p.Lo}{A.E} \dots\dots\dots(3.12)$$