

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1. PENGERTIAN BETON

Menurut SK SNI 03-2847-2002, beton didefinisikan sebagai campuran antara semen Portland atau semen hidrolis yang lain, agregat kasar, agregat halus dan air dengan atau tanpa bahan tambah yang membentuk massa padat. Karakteristik beton yang utama adalah mengenai kekuatan atau mutu beton itu sendiri, yaitu beton cenderung kuat menahan gaya tekan tetapi lemah terhadap tarik. Beton dapat dicetak menurut bentuk yang dikehendaki.

Semen Portland yang merupakan salah satu bahan pembentuk beton berasal pembakaran antara batu kapur bercampur dengan lempung di dalam tungku yang berputar dengan suhu 800°-950°C pada temperatur ini kapur dan lempung akan mengalami fusi sehingga menyatu membentuk Klinker padat. Lalu semen klinker tersebut akan jatuh ke bawah menjadi serbuk dan dicampur dengan gipsum (kalsium sulfat) agar terbentuk serbuk semen kering.[John, V.B,1983][11]

Beton dapat dicetak dalam lengkungan parabol, koloni, dan bentuk hiperbolik atau bentuk *dam, pier, abutment*. Keuntungan lain dari konstruksi beton adalah material yang digunakan seperti kerikil dan batu pecah yang mudah didapat dimana-mana sehingga harganya relatif murah. Selain itu untuk struktur sederhana seperti rumah tinggal dapat dikerjakan dengan alat yang sederhana pula. Akan tetapi untuk struktur yang rumit seperti bendungan atau gedung tinggi, membutuhkan alat-alat yang canggih seperti *tower crane, concrete pump, truck mixer* dan masih banyak lagi. Sebaliknya kerugian beton adalah kemungkinan pengiriman material yang bervariasi sehingga mempengaruhi sifat beton, untuk pembuatan beton yang dilaksanakan di tempat kerja (*site*) harus diperhatikan kontrol kualitasnya

II.2. JENIS-JENIS BETON

Teknologi beton terus berkembang seiring dengan kemajuan zaman, beton terus diteliti dan dikembangkan agar beton memiliki sifat yang lebih baik yaitu kekuatan tekan tinggi atau kepadatan yang tinggi, susut dan rangkai yang kecil, modulus elastisitas yang lebih besar, ketahanan panas yang baik sehingga kuat menahan temperature tinggi, daktilitas yang rendah (bersifat getas) serta mempunyai tidak mudah retak atau mempunyai ketegaran retak yang tinggi. Secara umum terdapat beberapa jenis dari beton, antara lain : beton massa, beton ringan, beton hampa, beton siklop, ferosemen, beton serat.

2.2.1. Beton Serat

Selama berabad - abad manusia berusaha untuk memperkuat konstruksi beton dan mortar dengan bermacam - macam serat. Pada jaman Romawi di pakai serat - serat rambut untuk pembuatan mortar. Kemudian teknologi penambahan bahan kimia mulai dipakai untuk peningkatan mutu beton, tetapi hal ini pada kenyataannya masih kurang, sehingga para ahli berusaha menempuh cara lain yang mengarah pada perbaikan mutu beton.

Suatu teknologi yang dikembangkan pertama kali di Amerika Serikat, dimana para peneliti telah berusaha memperbaiki sifat-sifat kurang baik dan beton dengan cara menambahkan serat (*fiber*) dalam jumlah tertentu pada adukan beton, yang dinamakan teknologi beton berserat.

Ide dasar adalah serat- serat dalam jumlah tertentu dicampurkan pada beton membentuk suatu sistem tulangan mikro yang tersebar secara merata didalam beton dan berfungsi melindungi beton dari keretakan.

Berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan, menunjukkan bahwa sifat-sifat beton yang dapat diperbaiki adalah :

- a. Kemampuan untuk menahan tarik dan momen lentur.
- b. Ketahanan terhadap beban kejut (*impact resistant*).
- c. Daktilitas yang berhubungan dengan kemampuan beton untuk menyerap energi.

- d. Ketahanan terhadap susut.
- e. Ketahanan terhadap aus (abrasi) dan lain - lainnya.

Secara garis besar, serat dapat digolongkan menjadi :

- a. Serat metal (*Metallic Fibers*)
- b. Serat polimer (*Polymer Fibers*)
- c. Serat mineral (*Mineral Fibers*)
- d. Serat-serat alamiah (*Naturally Occuring Fibers*)

2.2.1.1 Serat Metal

Serat metal terbuat dari baja karbon atau stainless steel. Serat metal memiliki kuat tarik antara 50 sampai 200 *ksi* (345 sampai 1300 *MPa*). Modulus elastisitas serat metal sekitar 29.000 *ksi* (200 *kPa*). Bentuk penampang serat metal dapat berupa lingkaran, setengah lingkaran, persegi atau tak beraturan. Serat metal mempunyai diameter antara 0,15-1,00 mm dan panjang 20-60 mm.

Serat metal sebagai bahan campur beton, ditambahkan pada saat pembuatan adukan beton berlangsung, yaitu dengan cara menaburkannya secara perlahan-lahan. Penaburan serat metal secara perlahan-lahan untuk menghindari terjadinya penggumpalan dan untuk memastikan bahwa serat metal terdistribusi dengan baik terdapat pada seluruh adukan beton.

Serat metal yang saling menempel (*glued*) dimaksudkan untuk memudahkan pencampuran pada adukan berkapasitas besar, misalnya pada pabrik beton segar. Metal yang menyatu tersebut (yang tiap rangkaian biasanya terikat 10-30 serat metal), akan segera terlepas setelah terkena air pada adukan dan menyebar secara merata keseluruh campuran beton.

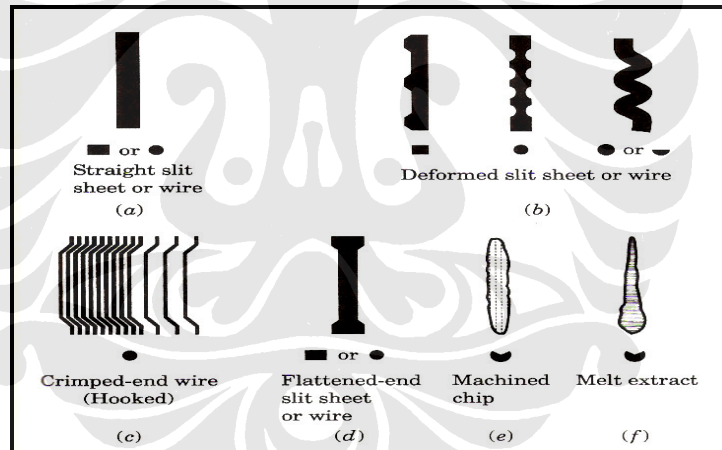
Faktor - faktor yang harus diperhatikan pada saat kita menggunakan serat metal pada adukan beton, yaitu:

- a. Bentuk serat metal
- b. Ukuran serat metal
- c. Kadar serat metal

A. Bentuk Serat Metal

Serat metal secara umum di produksi dalam dua bentuk, yaitu serat lurus dan serat yang bengkok pada ujungnya. Serat metal yang bengkok pada ujungnya, memberikan kekuatan penjangkaran yang lebih baik dibandingkan dengan serat metal yang lurus. Baiknya penjangkaran akan meningkatkan kemampuan dalam menahan retak, meningkatkan kekuatan serta keuletan beton. Berdasarkan bentuknya serat dapat dibagi atas tiga kelompok, yaitu:

- Serat metal yang bentuknya lurus dan lepas satu dengan yang lain (*loose straight steel fiber*)
- Serat metal dengan bagian ujung - ujungnya dibengkok dan satu dengan yang lain (*loose fiber hooked end*)
- Serat metal dengan bagian ujung- ujungnya bengkok dan saling menempel (*glued fiber hooked end*)



Gambar 2.1. Bentuk Serat Metal

(Sumber : Balaguru,N. Perumalsamy, Shah, P. Surendra," *Fiber Reinforced Cement Compositas*", McGraw.Hill International Editions,1992)

B. Ukuran Serat Metal

Yang dimaksudkan dengan ukuran dalam hal adalah panjang, diameter dan nisbah perbandingan antara panjang / diameter. Semakin panjang ukuran serat metal dengan rasio yang tinggi akan memberikan kinerja yang baik dalam peningkatan kekuatan dan absorpsi energi.

Serat metal yang baik untuk digunakan adalah serat metal dengan aspek rasio antara 60-100. Serat metal yang beraspek rasio diatas 100 akan menyulitkan pada saat pencampuran karena akan terjadi penggumpalan (*balling*) dan menurunnya kelecakan dalam adukan beton.

C. Kadar Serat Metal

Sampai saat ini kadar serat metal maksimum yang pernah ditambahkan adalah 120 kg/in³. Pembatasan kadar serat ini ditentukan oleh beberapa hal, yaitu efektifitas pertambahan kinerja yang dihasilkan, kemudahan pencampuran serta faktor ekonomis. Semakin besar kadar serat metal yang ditambahkan tidak selalu menghasilkan persentase pertambahan kinerja beton yang lebih baik. Disisi lain, penambahan serat metal dengan kadar yang besar akan meningkatkan kesulitan dalam pencampuran.

Hasil penelitian yang pernah dilakukan yang menggunakan kawat bendrat dengan panjang 60mm, 80mm dan 100mm menunjukkan bahwa tambahan 1% serat dan volume beton mampu menaikkan kuat tekan beton sekitar 25%, kuat tarik sekitar 47% dan modulus elastisitas sekitar 10 % [Irawan D,1995][3]

2.2.1.2. Interaksi Antara Serat dengan Pasta Semen

Interaksi antara serat dan pasta semen merupakan sifat dasar yang mempengaruhi kinerja dan beton komposit. Pemahaman dari interaksi ini diperlukan untuk memperkirakan dan meramalkan sifat - sifat kompositnya.

Berikut ini adalah parameter- parameter utama yang mempengaruhi interaksi serat dengan matriks:

- a. Kondisi dan matriks, *uncracked* atau *cracked*.
- b. Komposisi matriks.
- c. Bentuk serat dan jenis serat.
- d. Penyebaran serat, teratur atau acak.
- e. Volume fraksi dari serat.
- f. Ketahanan dan serat dalam komposit dalam jangka waktu panjang.

Serat memberikan sumbangan baik dalam hal kekuatan dan kekakuan. Jumlah dan

jenis kontribusinya bergantung dan jenis serat, volume fraksi serat dan sifat - sifat matriks.

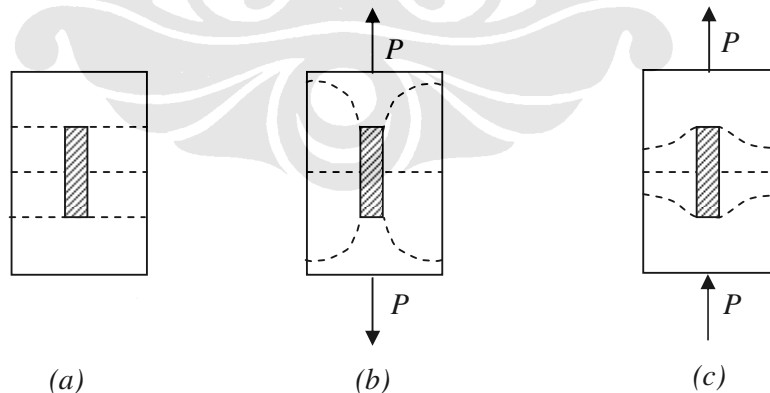
A. Interaksi Serat dengan Matriks homogen tanpa retak (*Homogeneous Uncracked Matrix*)

Tipe interaksi ini terjadi hampir disemua komposit selama tahap pembebanan awal. Pada gambar 2.2. Terdapat suatu sistem serat matriks yang terdiri dan serat tunggal. Sebelum terjadi pembebanan, tegangan pada matriks dan serat dianggap tidak ada,(gambar 2.2.a) .

Ketika matriks diberi beban, sebagian dari beban ditransfer ke serat disepanjang permukaannya. Karena adanya perbedaan kekakuan antara serat dengan matriks, terjadi tegangan geser disepanjang permukaan serat. Tegangan geser inilah yang membantu memindahkan gaya ke serat.

Jika serat lebih kaku dari matriks (serat metal dan mineral), deformasi disekitar serat menjadi lebih kecil, (gambar 2.2.b dan 2.2.c). Jika modulus serat lebih kecil dan modulus matriks (serat polimer dan alamiah), deformasi disekitar serat menjadi lebih besar.

Serat memberikan sumbangan baik dalam hal kekuatan dan kekakuan. Jumlah dan jenis kontribusinya bergantung dan jenis serat, volume fraksi serat dan sifat - sifat matriks.



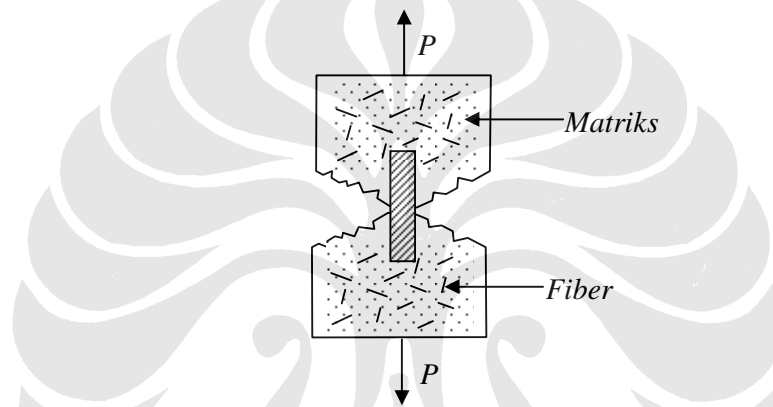
Gambar 2.2. Interaksi serta dan matriks, matriks tidak retak (a) Unloaded ; (b) tarik ; (c) tekan.

(Sumber : Balaguru,N. Perumalsamy, Shah, P. Surendra, ” *Fiber Reinforced Cement Compositas*”,

McGraw.Hill International Editions,1992)

B. Interaksi Serat dengan Matriks Retak (*Cracked Matrix*)

Ketika suatu komposit yang mengandung serat dibebani tarik , pada tahap tertentu matriks akan retak. Ketika matriks mengalami retak serat membawa gaya pembebanan melewati retakan, mentransfer beban dari satu sisi matriks ke sisi matriks yang lain. Serat akan berfungsi sebagai jembatan, membawa beban menyebrangi retakan. Jika serat dapat menyalurkan beban yang cukup menyebrangi retakan. Retakan - retakan lain akan terbentuk di sepanjang sampel / spesimen. Tahapan pembebanan ini disebut *multiple cracking stage*, yang terjadi pada beban servis (gambar 2.2.2).



Gambar .2.3. Interaksi serat dan matriks, matriks retak

(Sumber : Balaguru,N. Perumalsamy, Shah, P. Surendra, ” *Fiber Reinforced Cement Compositas*”)

C. Komposisi Matriks

Komposisi mikrostruktur dari semen Portland mempunyai pengaruh penting pada sifat - sifat dari komposit. Hidrasi semen menimbulkan lingkungan yang bersifat alkali, dengan PH sekitar antara 12 sampai 12,5. Ketahanan dari sifat serat dalam lingkungan alkali tinggi ini harus dipelajari secara mendalam, karena efek penguatan dan serat dapat menurun sebagai fungsi waktu.

D. Konsep Dasar Serat Berkekuatan Tinggi dan Daktail pada Pasta Beton yang Getas.

Alasan utama digunakannya serat sebagai bahan tambah pada matriks yang getas adalah untuk meningkatkan daktilitas dari matriks. Selain itu juga untuk meningkatkan kekuatannya. Berdasarkan penelitian yang ada diketahui bahwa penambahan serat dengan kadar yang lebih kecil dari 1% volume fraksi tidak memberikan tambahan kekuatan dan daktilitas yang signifikan.

Sedangkan matriks komposit dengan kadar volume fraksi lebih besar dari 2% akan memberikan tambahan kekuatan dan daktilitas yang baik.

Dengan kadar serat metal yang cukup, serat - serat tambahan tersebut akan mengikat matriks saat terjadi retak sekaligus berkontribusi terhadap disipasi energi melalui proses *debonding* dan *pull — out*. [Balaguru, 92] [1]

Tipe- tipe kehancuran dari beton komposit jenis ini dapat dibagi menjadi 3 tipe yaitu:

1. Beton komposit yang hancur secara tiba tiba setelah terjadi keretakan pada beton dasarnya. Kehancuran demikian terjadi pada beton komposit yang mendapat tambahan serat terlalu sedikit.
2. Pada jenis kehancuran ini setelah terjadi keretakan pada beton dasar akan terlihat adanya penurunan kapasitas beban, namun secara komposit tetap mampu menahan beban meskipun lebih kecil dari beban puncak sebelumnya (*peak load*). Ketika terjadi keretakan pada beton dasar beban yang ada akan ditransfer dari beton komposit kepada serat saja. Jadi setelah terjadi retak hanya serat yang menahan gaya atau beban yang diiringi dengan meningkatnya deformasi sampai akhirnya serat terlepas dan ikatan beton. Pada komposit jenis ini penambahan serat tidak memberikan peningkatan kekuatan, tetapi memberikan peningkatan daktilitas yang baik. Peningkatan daktilitas dapat dilihat dari luasnya area yang berada dibawah kurva tegangan regangan.
3. Bila kandungan dari serat metal mencukupi (lebih besar dari 2%) maka setelah terjadi keretakan pada beton serat- serat akan mengambil alih beban dengan kemampuan yang semakin meningkat hingga mencapai beban tertinggi dan menyebabkan tercabutnya serat (*fiber pull out*).

2.3. BETON PRATARIK

Prinsip dari beton pratarik telah digunakan selama berabad – abad. Pratarik berarti suatu tegangan yang bekerja sekalipun tidak ada beban mati atau beban hidup yang bekerja. Pada masa kini adalah didalam konstruksi beton penerapan dari konsep pratarik telah digunakan dalam skala besar terutama dalam membangun jembatan.

Secara umum pratarik mencakup penjumlahan dari tegangan – tegangan dengan tanda yang berlawanan dengan yang ditimbulkan oleh penerapan dari beton kerja yang berikutnya. Sebagai contoh, kabel pratarik yang ditempatkan secara eksentris di dalam suatu balok sederhana menimbulkan tekan aksial berikut momen lentur negatif dalam beton.

Dengan demikian adalah mungkin untuk menjaga agar semua penampang berada dalam tekan sewaktu beban – beban layan di tambahkan. Ini merupakan keuntungan besar karena beton lemah terhadap tarik, namun kuat dalam tekan. Tentu saja, baja digunakan untuk menambahkan pratarik namun jumlah yang dibutuhkan untuk beton pratarik adalah lebih sedikit dibandingkan dengan beton bertulang biasa. Secara umum dapat dikatakan bahwa pratarik menyajikan suatu cara untuk penggunaan bahan yang paling ekonomis yaitu, baja dalam tarik dan beton dalam tekan. [Wang,Chu – Kia,1986][7]

2.3.1. Tiga Konsep Dasar Beton Pratarik

2.3.1.1. Konsep Beton Elastis

Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis. Ini merupakan buah pemikiran Eugene Freyssinet yang memvisualisasikan beton pratarik pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan (desakan) terlebih dahulu pada bahan tersebut.

Dari Konsep ini lahirlah kriteria ” tidak ada tegangan tarik ” pada beton. Umumnya telah diketahui bahwa jika tidak ada tegangan tarik pada beton, berarti tidak akan terjadi retak, dan beton tidak merupakan bahan yang getas lagi melainkan berubah menjadi bahan elastis.[Burns, H & Ned, T.Y. lin,1991][20]

Rumus untuk distribusi tegangan yang dihasilkan adalah :

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{My}{I} \quad (2.1)$$

2.3.1.2. Konsep Gaya Dalam

Konsep ini mempertimbangkan beton pratarik sebagai kombinasi (gabungan) dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan tekanan, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal.

Pada beban layan, titik – titik tangkap dari gaya – gaya C dan T (C=T) dalam beton bertulang adalah bebas dari besarnya momen lentur yang bekerja, dan tergantung hanya dari dimensi potongan dan perbandingan modulus elastisnya dengan demikian besar gaya – gaya secara langsung sebanding dengan momen lentur yang bekerja .

Di dalam beton pratarik, besar dari gaya – gaya dalam bebas dari momen lentur yang bekerja dan tergantung hanya pada pratarik dan presentase kehilangan. Di dalam hal ini letak gaya C harus bervariasi sesuai dengan beban yang bekerja. Cara ini dapat disimpulkan dalam langkah – langkah berikut :

1. Suatu gaya pratarik yang diketahui dan yang dikerjakan terhadap baja, menentukan besarnya T
2. Momen M yang dikerjakan di atas balok.
3. Untuk keseimbangan, lengan momen= M/T dan $C=T$.
4. Dengan mengetahui besar dan letak titik tangkap dari gaya C, tegangan pada beton dapat dihitung sebagai

$$f = \frac{C}{A} \pm \frac{Cey}{I} \quad (2.2)$$

2.3.1.3. Konsep Beban Berimbang

Konsep ini memandang pratarik terutama sebagai suatu proses pengimbangan beban pada unsur. Tendon pratarik diletakkan sedemikian hingga eksentrisitas dari gaya pratarik bervariasi dalam cara yang serupa seperti momen dari beban – beban luar, yang jika dikerjakan persis akan menghasilkan tegangan lentur yang

nol dan hanya tegangan aksial P/A (P adalah komponen horisontal dari gaya dalam tendon) yang bekerja. Gambar 2.3.1.a menunjukkan tendon yang direntangkan secara parabolis. Gambar 2.3.1.b memberikan badan bebas dari gaya – gaya yang bekerja pada beton akibat pratarik saja. Pengaruh dari pratarik dapat dipandang sebagai suatu beban merata ke atas jika tendon direntangkan secara parabolis. Momen pratarik maksimum sebesar $T \times e_{maks}$ pada tengah bentang

dapat disamakan dengan momen balok akibat beban merata ekuivalen $\frac{W_p L^2}{8}$,

sehingga

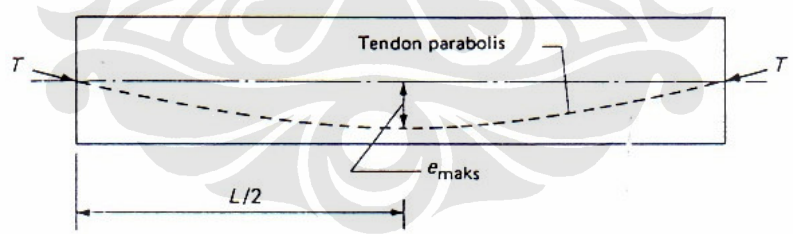
$$w_p = \frac{8Te_{maks}}{L^2} = \text{beban merata ekuivalen (keatas)} \quad (2.4)$$

Jika, $W_{net} = w$ (beban ke bawah sebesarnya) - w_p , maka

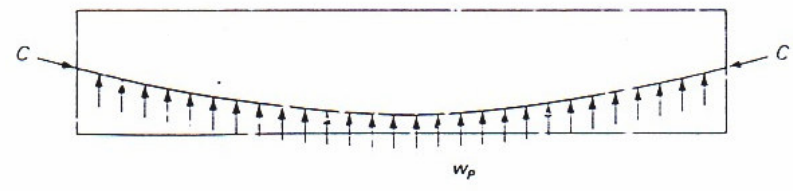
$$M_{net} = \frac{w_{net} L^2}{8} \quad (2.5)$$

dan $f = -\frac{C}{A} \pm \frac{M_{net} y}{I}$ (2.6)

Bila tendon direntangkan tidak dengan bentuk parabolis, momen netto sebenarnya (momen beban kerja minus momen pratarik dapat digunakan untuk M_{net} dalam persamaan



(a) Balok dengan tendon yang direntangkan parabolis



(b) Gaya-gaya yang bekerja pada beton dari pratarik saja

Gambar 2.4. Konsep beban berimbang dari pratekan

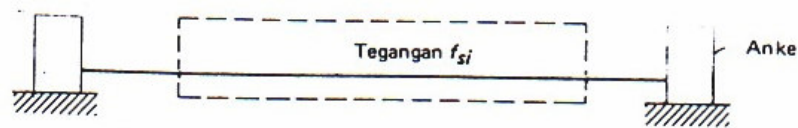
2.3.2. Sistem Balok Pratarik

Prosedur yang paling umum adalah mengerjakan gaya tarik tertentu dalam kabel – kabel dengan menariknya di antara dua anker sebelum pengecoran beton. Beton kemudian dicorkan dan kabel – kabel menjadi melekat dengan beton dalam keseluruhan panjang. Setelah beton mengeras, kabel – kabel menjadi melekat dengan beton dalam keseluruhan panjang. Setelah beton mengeras, kabel – kabel diputus pada kedua anker. Pemendekan yang tiba – tiba dari kabel – kabel melalui lekatan memindahkan suatu tegangan tekan dalam beton. Proses yang demikian dinamakan pratarik (*pretensioning*).

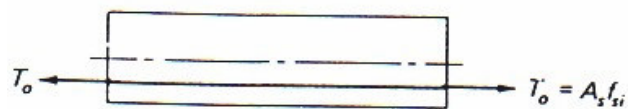
1. Langkah 1 : seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.a adalah menarik kabel – kabel diantara dua anker dalam tempat pengecoran cukup untuk menimbulkan suatu tegangan tarik f_{ci} di dalam kabel – kabel, menurut ACI-18.5.1 tidak boleh melebihi harga yang terkecil dari 85% dari kekuatan f_{pu} yang ditetapkan, dan 94 % dari kekuatan leleh f_{pu} yang ditentukan untuk baja. Beton yang mutunya dijaga dengan seksama kemudian dicorkan di dalam acuan dan dikeringkan dengan uap panas dengan sering. Kekuatan beton harus dicapai sepenuhnya pada saat diberikannya penekanan, karena itu umumnya digunakan semen yang cepat memperoleh kekuatannya. Umumnya, kekuatan beton f'_{ci} pada saat pemindahan ditetapkan oleh perencana sekitar 4000 sampai 4500 $lb/inci^2$.
2. Langkah 2, memutus kabel. Gaya T_o dalam kabel – kabel yang bekerja melalui lekatan, bekerja sebagai gaya tekan pada keseluruhan penampang efektif (transformasi). Tegangan di dalam beton sebelum pemutusan kabel naik mulai dari nol, sampai kepada yang diperlihatkan dalam gambar 2.5.c. Sekali gaya pratarik dikenakan, kehilangan tertentu di dalam pratarik mulai terjadi. Kehilangan pratarik dapat timbul akibat selip dalam anker, perpendekan elastis dari unsur beton, rangkakan dan susut beton, relaksasi dari tegangan baja, dan kehilangan gesekan akibat dari lengkungan yang disengaja atau tidak disengaja dalam kabel. Sebagian kecil dari kehilangan yang demikian dapat terjadi sebelum pemindahan dari tegangan ke dalam beton, namun adalah

praktis dan konservatif untuk menganggap bahwa keseluruhan kehilangan terjadi setelah pemindahan tegangan. Beban mati dari unsur lentur saja akan bekerja secara serentak dengan gaya pratarik di tunjukan di dalam gambar , dimana keadaan tegangan yang paling kritis terjadi segera setelah perpindahan dan sebelum kebanyakan kehilangan terjadi. Harga – harga batas (ACI 18.4.1) untuk keadaan sementara ini adalah tegangan tarik pada bagian atas balok sebesar $3\sqrt{f'ci}$ (sekitar 40% dari kekuatan tarik) dan tegangan tekan pada bagian bawah balik sebesar 60% dari kekuatan beton $f'ci$ yang telah dicapai pada saat pemindahan. Satu alasan untuk menjaga tegangan tarik sementara dengan harga serendah itu adalah demi mencegah kemungkinan suatu tekuk ke atas dari balok akibat dari retak yang tiba – tiba di atas balok. Seringkali tidak ada tulangan (buka pratarik) yang tersedia untuk menahan retak yang demikian.

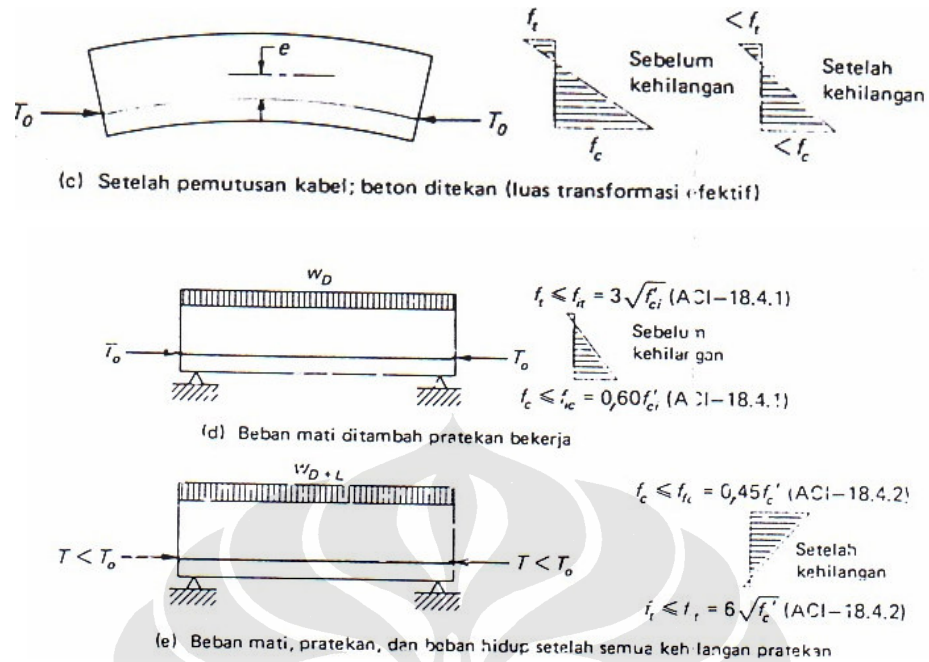
- Langkah 3, adalah kondisi layan dari beban mati, beban hidup, dan pratarik, (gambar 2.5.e) dimana setelah kehilangan, ACI-18.4.2. mengizinkan suatu tegangan tarik netto pada bagian bawah yang tidak melebihi $0.6\sqrt{f'c}$, dengan tegangan tekan pada bagian atas yang tidak melebihi $0,45f'c$. Oleh karena tendon biasanya ditempatkan ditempatkan di dekat permukaan bawah, kemungkinan bahaya dari retak yang tiba – tiba dan tekuk hanya kecil. Untuk alasan ini tegangan tarik yang diizinkan diambil hanya sedikit di bawah $0,75\sqrt{f'c}$, yang umumnya merupakan harga yang diakui sebagai modulus runtuh dari beton berbobot normal.



(a) Kabel ditarik dengan tegangan f_{sj} ; kemudian beton dicor



(b) Sebelum memotong kabel; tidak ada tegangan dalam beton



Gambar 2.5. Tahap perilaku sampai dengan beban kerja – balok pratarik.
 (Sumber : Wang, Chu – Kia, Charles G. Salmon, “Desain Beton Pratarik, Jilid I”, Erlangga)

2.3.3 Kehilangan Gaya Pratarik

Besarnya pratarik yang sebenarnya ada di dalam suatu batang beton pratarik tidak dapat diukur dengan mudah. Gaya total di dalam tendon pada saat penarikan merupakan besaran yang dapat ditentukan dengan mudah.

Berbagai macam kehilangan menurunkan pratarik menjadi harga yang lebih rendah yang tersedia untuk memikul beban. Selisih pratarik menjadi harga yang lebih rendah yang tersedia untuk memikul beban. Selisih pratarik menjadi harga yang lebih rendah yang tersedia untuk memikul beban. Selisih antara pratarik akhir yang ada dan harga awal dinamakan sebagai kehilangan pratarik.

Di dalam praktek pratarik awal umumnya ditentukan dengan suatu pengukuran (pengukuran *gage*) pada dongkrak (*jack*) dan dapat diperiksa dengan suatu pengukuran langsung dari perpanjangan tendon. Didalam proses pasca tarik tertentu, gaya pratarik akan mengecil akibat gesekan pada titik – titik yang jauh dari sumber dongkrak. Namun, pratarik awal umumnya diketahui dengan ketelitian yang seksama.

2.3.3.1. Perpendekan Elastis

Kehilangan pratarik akibat perpendekan elastis dapat ditentukan dengan dengan mudah. Sebagai contoh, misalkan T_o sebagai gaya pratarik yang diterapkan pada pusat penampang beton di dalam unsur pratarik. Jika T_f merupakan gaya tarik akhir dalam tendon tepat setelah terjadinya perpendekan elastis, maka regangan (satuan perpendekan) di dalam beton dapat dinyatakan sebagai

$$\epsilon_c = \frac{f_c}{E_c} = \frac{T_f}{A_c E_c} \quad (2.7)$$

di mana $A_c = A_g - A_s$, perubahan dalam regangan dalam tendon sebagai hasil dari kehilangan adalah

$$\Delta \epsilon_s = \frac{T_o - T_f}{A_s E_s} \quad (2.8)$$

Dengan menyamakan rumus untuk ϵ_c dan $\Delta \epsilon_s$ diperoleh

$$\frac{T_o}{T_f} = \frac{A_c + nA_s}{A_c} = \frac{A_T}{A_c} = \frac{A_T}{A_c} \quad (2.9)$$

kehilangan pratarik Δf_s adalah

$$\Delta f_s = \frac{T_o - T_f}{A_s} = \frac{nT_f}{A_c} = \frac{nT_o}{A_T} \quad (2.10)$$

Sebagai masalah praktek, kehilangan di dalam pratarik Δf_s , tanpa tergantung apakah gaya pratarik diterapkan pada titik pusat penampang bruto atau tidak, dapat diambil secara pendekatan sebagai :

$$\Delta f_s = \frac{nT_o}{A_g} \quad (2.11)$$

Lebih tepatnya kehilangan di dalam kasus pasca tarik, umumnya tendon tidak ditarik secara bersamaan. Lebih lanjut perpendekan elastis terjadi secara bertahap operasi penarikan.

2.3.3.2. Relaksasi dari Tegangan Baja

Relaksasi diartikan sebagai kehilangan dari tegangan pada baja di bawah regangan yang hampir konstan dan suhu yang konstan. Kehilangan akibat relaksasi sangat bervariasi untuk baja yang berbeda – beda, dan kehilangan seperti ini harus diberikan sesuai dengan data percobaan yang diberikan oleh pabrik baja. Kehilangan ini umumnya dimisalkan berkisar antara 2 %- 3% dari tegangan baja awal. Presentase kehilangan pratarik yang berkaitan dengan relaksasi bervariasi sesuai dengan jenis tendon dan perbandingan dan pratarik awal terhadap kekuatan tarik dari tendon.

2.3.3.3. Kehilangan Akibat Gesekan dalam Unsur Pasca Tarik

Kehilangan akibat gesekan yang umumnya kecil akan terjadi di dalam alat dongkrak, dan juga akibat gesekan antara tendon dengan bahan sekitarnya (pipa atau beton) pada kelengkungan yang disengaja atau tidak disengaja dalam tendon. Gesekan antara tendon dan bahan sekeliling tidaklah kecil dan dapat dipandang sebagai akibat pengaruh panjang dan sebagian akibat pengaruh lengkungan.

Dengan dx merupakan suatu segmen dari tendon yang melengkung. Misalkanlah bahwa tendon didongkrak dari ujung kiri dengan gaya P_s yang berakibat dalam gaya P_x , pada suatu tempat di sebelah kanan, gaya – gaya ini menentukan batas – batas untuk tarik t . Sudut total yang dicakup di dalam busur adalah α .

Untuk keseimbangan dari keseluruhan segmen dx , gaya normal dN adalah

$$dN = t \left(\frac{d\alpha}{2} \right) + \left(t + \frac{dt}{d\alpha} d\alpha \right) \frac{d\alpha}{2} \quad (2.12)$$

dan dengan mengabaikan infinitesimal dengan orde yang lebih tinggi,

$$dN = 2t \left(\frac{d\alpha}{2} \right) = td\alpha \quad (2.13)$$

Gaya gesek yang timbul sepanjang dx adalah

$$\mu dN = \mu td\alpha \quad (2.14)$$

Penjumlahan gaya – gaya sepanjang tendon menghasilkan

$$t - \mu td\alpha - (t + dt) = 0 \rightarrow \frac{dt}{t} = -\mu d\alpha \quad (2.15)$$

Integrasi untuk memperoleh pengaruh total bagian lengkungan yang dicakup

dalam sudut α ,

$$\int_{P_x}^{P_x} \frac{dt}{t} = \int_0^{\alpha} -\mu d\alpha \quad (2.16)$$

$$\log_e P_x - \log_e P_s = -\mu\alpha \quad (2.17)$$

$$\frac{P_x}{P_s} = e^{-(\mu\alpha + KL)} \quad (2.18)$$

atau

$$P_s = P_x e^{(\mu\alpha + KL)} \quad (2.19)$$

yang merupakan rumus ACI dalam. Perhatikan bahwa $\alpha=L/R$, yakni panjang L dari kurva dibagi dengan jari – jari kelengkungan R

Sebagai suatu pendekatan, bila P_s-P_x cukup kecil (misalnya tidak lebih dari 15% - 20 % dari gaya dongkrak P_s), gaya gesek dapat dianggap konstan. Jika gaya gesek dimisalkan sebanding dengan gaya P_x , maka :

$$\mu N - \mu P_x \alpha \quad (2.20)$$

dan dengan memisalkan bahwa efek panjang KL juga sebanding dengan P_x , keseimbangan menyaratkan bahwa

$$P_s = P_x + P_x (\mu\alpha + KL) \quad (2.21)$$

$$P_s = P_x (1 + \mu\alpha + KL)$$

yang merupakan rumus ACI yang diizinkan bila $\mu\alpha + KL$ tidak melebihi 0,3

2.3.3.4. Perencanaan Praktis Kehilangan-Total

Kehilangan total dalam pratarik dapat dinyatakan dalam regangan satuan, regangan total, tegangan satuan atau dalam presentase terhadap tegangan awal. Sekalipun jumlah kehilangan pategang cukup sulit untuk dibuat umum, Lin dan Burns telah menyarankan bahwa untuk sifat rata – rata untuk beton dan baja, dan untuk kondisi rata – rata pengerasan, harga – harga dalam tabel dapat diambil sebagai harga representatif.

Zia dan kawan – kawan dalam hal ini menyatakan bahwa batas atas untuk kehilangan total dalam tegangan baja (tidak termasuk kehilangan akibat gesek) untuk kabel yang ”*stress relieved*” dalam beton berbobot normal dapat diambil sebesar 50.000 lb/inci².

Jenis Kehilangan	Pratarik (persen)
Perpendekan elastis dan lentur elastis dari unsur beton	4
Rangkak beton	6
Susut Beton	7
Relaksasi (rangkak) dalam baja	8
Total	25

Tabel 2.1. Perencanaan Praktis Persen Kehilangan Total Pratarik

2.3.4. Keunggulan dan Kerugian Beton Pratarik

Konsep awal dari beton pratarik adalah bahwa beton bebas dari retak – retak di bawah beban–beban layan. Khususnya bila struktur dibuat terbuka terhadap cuaca, penghilangan retak – retak berarti pencegahan karat. Juga bagian pratarik yang bebas retak memiliki kekakuan yang lebih besar di bawah beban – beban layan karena seluruh penampangnya bekerja efektif.

Pratarik mengakomodir susut dan rangkak dengan cukup baik. Beton bermutu tinggi secara lebih efisien dapat dimanfaatkan hanya dengan menyesuaikan gaya pratarik.

Pratekan dari beton mengurangi kecenderungan akan terjadinya retak – retak miring, dan penggunaan dari tendon yang melengkung memberikan suatu komponen vertikal dalam membantu untuk memikul geser. Kekuatan geser disini lebih konsisten ketimbang geser di dalam beton bertulang biasa.

Ciri –ciri lain dari beton pratarik adalah kemampuannya yang tinggi untuk menyerap energi dan perlawanan yang tinggi terhadap kelelahan bahan (fatik) khususnya yang ditimbulkan oleh variasi tegangan baja yang rendah akibat dari

pratarik awal yang lebih tinggi, dan kapasitas beban hidupnya yang tinggi akibat dari kemampuan tendon pratarik dalam memikul beban mati. Penggunaan dari beton pratarik juga mengizinkan pengujian sebagian dari baja dan beton melalui penerapan dari pratarik.

Beberapa kerugian dari konstruksi pratarik adalah :

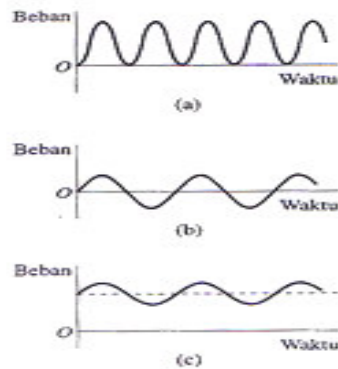
1. Bahan – bahan bermutu tinggi yang digunakan mempunyai harga satuan yang lebih tinggi.
2. Kemungkinan diperlukan acuan yang lebih rumit.
3. Pengangkuran ujung dan pelat landas lazimnya diperlukan.
4. Upah buruh lebih tinggi.

Kondisi – kondisi yang lebih banyak harus diperiksa di dalam perencanaan dan diperlukan pengendalian yang lebih ketat dari setiap fase dari pelaksanaan

2.4. BEBAN BERULANG DAN FATIK

Prilaku suatu struktur bergantung bukan hanya pada sifat bahan melainkan juga pada karakter beban. Ada situasi dimana struktur menerima beban statis yaitu beban yang besarnya tetap ataupun terjadi perubahan secara perlahan-lahan dan bekerja untuk jangka waktu lama. Beban lain ada yang bersifat dinamis contohnya adalah beban kejut yang bekerja tiba-tiba dan beban berulang yang terjadi sejumlah besar siklus.

Pola khas beban berulang ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Gambar pertama (a) menunjukkan beban yang diterapkan, dihilangkan, dan diterapkan lagi, selalu bekerja dalam arah yang sama. Gambar kedua (b) Menunjukkan beban berganti yang berubah arah setiap siklus pembebanan, dan gambar ketiga (c) menggambarkan beban berfluktuasi yang bervariasi di sekitar harga rata-rata. Beban berulang biasanya berkaitan dengan mesin, turbin, generator, propeler, bagian bagian pesawat, bagian bagian mobil, dan sebagainya. Beberapa jenis struktur ini mengalami jutaan (atau bahkan milyaran) siklus pembebanan selama masa gunanya



Gambar 2.6. Pola Khas Beban Berulang.

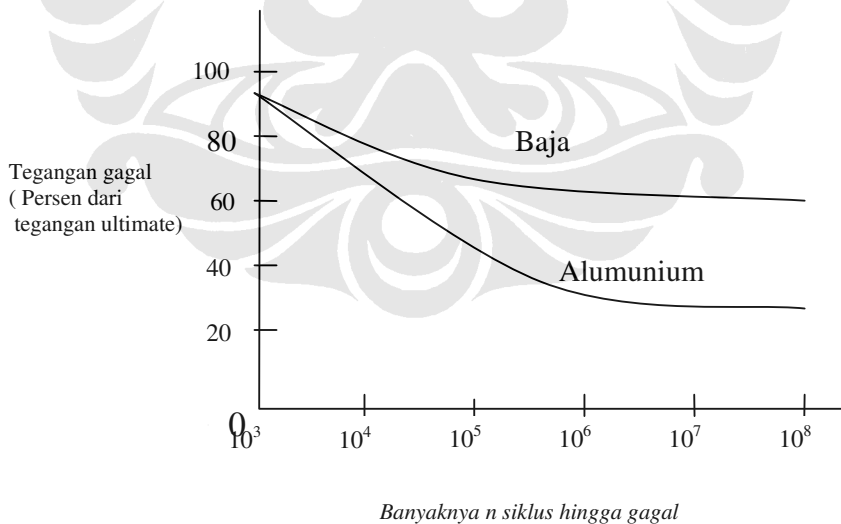
(Sumber : Wang, Chu – Kia, Charles G. Salmon, “Mekanika Bahan, Jilid I”, Erlangga)

Kegagalan suatu struktur dapat terjadi akibat kelelahan atau fatik. Fatik dapat didefinisikan sebagai rusaknya bahan akibat siklus tegangan dan regangan yang berulang kali, yang menyebabkan terjadinya retak progresif dan pada akhirnya menghasilkan fraktur/runtuh. Sedangkan *fatigue strength* pada beton definisinya adalah bagian dari kekuatan statis beton yang dapat dipikul secara terus-menerus ketika diberikan sejumlah beban yang berulang-ulang. Kekuatan suatu struktur terhadap kelelahan tergantung dari komposisi beton, kondisi lingkungan, kondisi pembebanan dan properti mekanisnya bahkan menurut penelitian oleh Kleeber and Lee [17] menuliskan bahwa kelelahan beton didalam lenturan pada suatu kondisi tertentu tergantung pada rasio air-semen. Dimana kuat lelah menurun pada beton yang rasio air-semen nya rendah sedangkan pada beton mutu tinggi, beton bersifat lebih daktail dari pada beton mutu biasa ketika mengalami beban yang berulang (*fatigue loading*).

Suatu struktur yang mengalami beban dinamik cenderung gagal pada tegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan beban yang sama yang diterapkan secara statik, khususnya bila beban berulang sebanyak sejumlah besar siklus. Contoh terkenal kegagalan fatik adalah peristiwa memberikan tegangan pada klip (penjepit kertas) logam hingga mencapai titik putusnya dengan berulang kali melenturkannya bolak balik. Sebetulnya jika klip dilenturkan hanya sekali, dia tidak akan putus. Tetapi bila dia dilenturkan ke arah sebaliknya, dan jika keseluruhan siklus pembebananan diulang beberapa kali, Akhirnya klip akan putus.

Pada kegagalan fatik yang khas, retak mikroskopik terbentuk titik dimana ada tegangan tinggi biasanya di pemusatan tegangan dan secara perlahan lahan membesar karena beban diberikan secara berulang ulang. Apabila retak menjadi sedemikian besar sehingga bahan yang tersisa tidak menahan beban, maka fraktur tiba-tiba pada bahan terjadi dan tergantung pada sifat bahan, jumlah siklus untuk menghasilkan kegagalan fatik bisa bervariasi dari hanya sedikit saja sampai ratusan juta siklus

Sebagaimana telah disebutkan, besarnya beban yang menyebabkan kegagalan fatik lebih kecil dari pada beban yang dapat di tahan secara statis untuk menentukan beban gagal, pengujian bahan harus dilakukan. Dalam hal beban berulang, bahan di uji pada berbagai taraf tegangan dan banyaknya siklus hingga gagal di hitung. Data-data yang didapat akan digunakan untuk memplot kurva ketahanan, atau diagram S-N, di mana tegangan gagal (S) diplot versus banyaknya (N) siklus hingga gagal. Kurva ketahanan seperti terlihat dalam gambar 2.7 menunjukkan bahwa semakin kecil tegangan, semakin banyak siklus yang menyebabkan kegagalan.



Gambar 2.7. Diagram S-N.

(Sumber : Kleeber J, Lee H, “ *Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete*”, ACI)

2.5. IMPULS

Beban impuls dapat didefinisikan sebagai beban yang disebabkan oleh benturan antara 2 benda atau lebih material [Zukas,1979][8].

Pembebanan impuls adalah pembebanan yang berlangsung dalam selang waktu yang singkat. Impuls pada pembebanan ini didefinisikan sebagai perkalian dari gaya dan selang waktu bekerjanya gaya tersebut. Contoh impuls dari suatu gaya $F(\tau)$. Pada waktu τ selang interval $d\tau$, yang digambarkan oleh daerah bersisir, sama dengan $F(\tau)d\tau$. Impuls ini bekerja pada masa m yang dapat ditentukan dari Hukum Gerak Newton seperti :[Paz,Mario][3]

$$m \frac{dv}{dt} = F(\tau) \quad (2.22)$$

diatur kembali sehingga didapat

$$dv = \frac{F(\tau)dt}{m} \quad (2.23)$$

dimana $F(t) dt$ adalah impuls dan dv adalah pertambahan kecepatan. Pertambahan kecepatan ini dapat diambil sebagai kecepatan awal dari suatu massa pada waktu τ . Sekarang kita tinjau impuls $F(\tau) dt$ pada struktur yang dinyatakan sebagai osilator tak teredam. Pada waktu τ , osilator mengalami perubahan kecepatan, diberikan oleh persamaan diatas. Perubahan kecepatan ini dimasukkan pada persamaan $y = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$ sebagai kecepatan awal v_0 bersama dengan perpindahan awal $y_0=0$ pada waktu τ , yang mengakibatkan perpindahan pada waktu berikutnya t , diberikan oleh

$$dy(t) = \frac{F(t)dt}{m\omega} \sin \omega(t - \tau) \quad (2.24)$$

Proses pembebanan dapat dilihat sebagai suatu seri dari impuls pendek pada setiap pertambahan waktu $d\tau$, dimana setiap impuls tersebut membentuk respons differensial pada waktu t dengan bentuk seperti persamaan diatas. Sebab itu dapat disimpulkan bahwa perpindahan total pada waktu t akibat suatu aksi berkesinambungan dari gaya $F(\tau)$ diberikan oleh penjumlahan atau integral dari perpindahan differensial $dy(t)$ dari waktu $t = 0$ sampai waktu t , yaitu

$$y(t) = \frac{1}{m\omega} \int F(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (2.25)$$

integral pada persamaan ini dikenal sebagai integral Duhamel. Persamaan diatas menyatakan perpindahan total akibat pengaruh gaya $F(\tau)$ yang bekerja pada isolator tak teredam, yang mana termasuk didalamnya komponen keadaan tetap (steady state) dan komponen transien (transient) dari gerak. Bila fungsi $F(\tau)$ tak dapat dinyatakan secara analitis, maka integral persamaan diatas hampir selalu dapat dievaluasi dengan metode numerik yang benar. Untuk memperhitungkan pengaruh perpindahan awal y_0 dan kecepatan awal v_0 pada waktu $t=0$, hanya diperlukan menambahkan solusi sebagai akibat dari kondisi awal. Jadi perpindahan total dari sistem tak teredam berderajat kebebasan tunggal dengan gaya yang berubah, diberikan oleh :

$$y(t) = y_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t + \frac{1}{m\omega} \int F(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (2.26)$$

2.6. SIFAT MEKANIK BETON

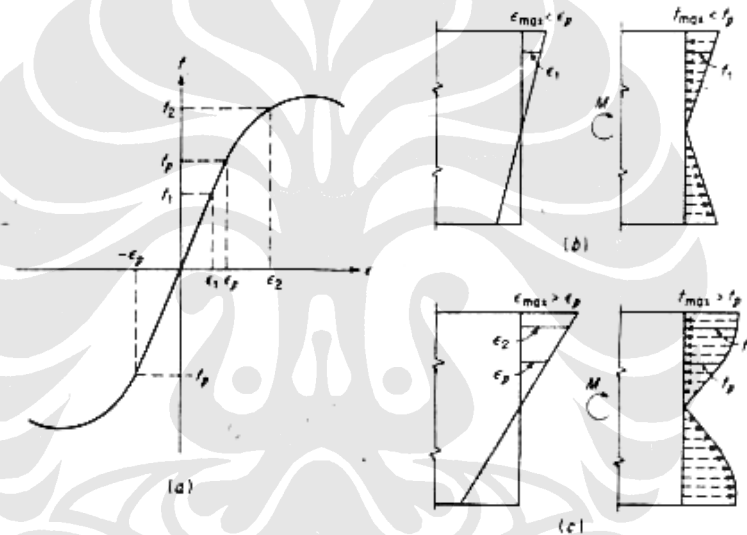
2.6.1. Tegangan Lentur Balok Beton Homogen

Beton tanpa tulangan disebut juga beton yang homogen sedangkan beton bertulang adalah beton yang tidak homogen karna secara keseluruhan terbuat dari 2 material yang berbeda yaitu beton dan tulangan. Prinsip dasar distribusi tegangan lentur pada beton homogen secara garis besar sama seperti pada balok, baja, kayu atau material struktur lainnya, dimana apabila diberi beban dari atas maka di setiap potongan balok tegangan tekan terjadi pada sisi atas garis normal sedangkan tegangan tarik pada sisi bawahnya. [Winter, G & H. N, Artur][18].

Tegangan lentur f_y pada balok homogen pada sembarang titik tergantung dari regangan pada titik tersebut sesuai dengan diagram tegangan-regangan material beton (gambar 2.8.a). Pada saat balok dibebani dimana jika regangan maksimum yang terjadi pada serat terluar ϵ_l lebih kecil dari ϵ_p dimana hubungan tegangan-regangan sesuai dengan diagram masih linear maka tegangan tekan dan tarik juga

akan linear (*proportional*) terhadap sumbu x (gambar 2.8.b). Tetapi apabila saat dibebani tegangan maksimum pada serat terluar lebih besar dari ϵ_p maka hubungan tegangan-regangan tidak lagi proporsional (gambar 2.8.c).

Jika balok tersebut terus dibebani, selama tegangan tarik pada penampang tidak melebihi kuat tarik beton f_c yaitu sebesar $0.7 \sqrt{f'_c}$ (dengan f'_c adalah kuat tekan yang disyaratkan) penampang balok tersebut dianggap belum retak, sedangkan diagram distribusi tegangan tekan pada beton mendapatkan bentuk lengkung yang sesuai dengan diagram tegangan-regangan (gambar 2.8.a).

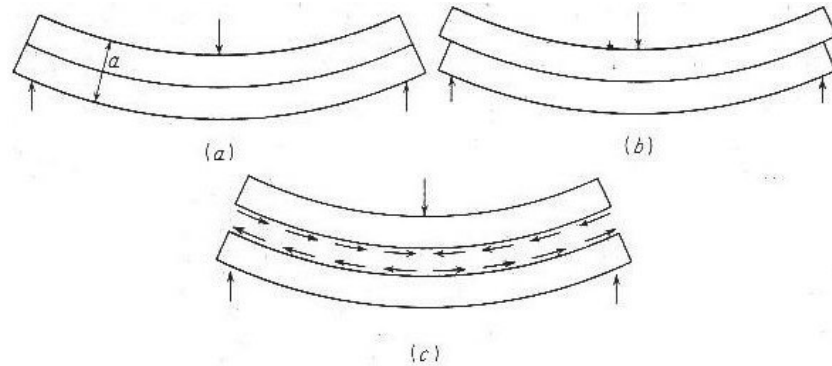


Gambar 2.8. Distribusi tegangan Elastis dan Inelastis pada balok homogen

(Sumber : Winter, G & H. N, Artur, " *Design Of Concrete Structures* " 9-th ed. McGraw.Hill International, 1981, gambar 2.4, hal 47)

2.6.2. Tegangan Geser

Adanya tegangan geser ini dapat dengan mudah divisualisasikan dengan memperhatikan dua balok. Balok yang pertama menggunakan bidang - bidang yang tak dihubungkan (serupa dengan tumpukan kartu), dan balok lainnya terbuat dari satu material utuh. (gambar 2.9)



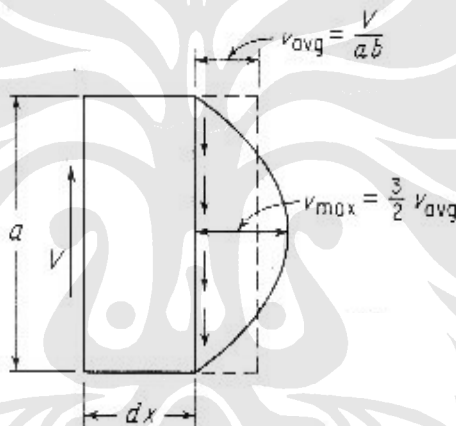
Gambar 2.9. Distribusi tegangan sepanjang bidang horizontal.

(Sumber : Winter, G & H. N, Artur, " *Design Of Concrete Structures* " 9-th ed. McGraw.Hill International, 1981, gambar 2.13, hal 64)

Apabila dibebani pada balok yang pertama akan terjadi gelincir diantara bidang - bidang pembentuk balok. Pada balok yang utuh tidak terjadi gelincir. Hal ini disebabkan oleh adanya tegangan geser horisontal yang dapat mencegah gelincir. Selama materialnya mampu memikul tegangan geser horisontal ini bidang - bidang yang bersebelahan pada balok utuh tidak akan tergelincir dan balok tersebut tetap utuh .

Besar tegangan horisontal ini dapat diperoleh dengan meninjau keseimbangan horisontal bagian kiri atas balok (ingat bahwa setiap struktur harus berada dalam keadaan seimbang). Agar keseimbangan horisontal terpenuhi, jelaslah bahwa tegangan lentur pada muka kiri penampang yang mempunyai resultan ke kiri harus diimbangi oleh suatu gaya internal yang arahnya ke kanan. Gaya yang dimaksud ini merupakan resultan dari tegangan geser horisontal pada muka horisontal balok. Bidang - bidang horisontal lain pada balok itu juga mempunyai tegangan geser yang bermacam - macam. Gaya dan tegangan yang terjadi lebih kecil daripada potongan tengah balok , karena tegangan lentur yang bekerja pada luas yang lebih kecil sehingga menghasilkan gaya horisontal yang lebih kecil. Dengan demikian pada lapisan teratas balok tidak ada gaya atau tegangan geser sama sekali. Dapat dibuktikan bahwa distribusi tegangan geser ini bervariasi secara parabolik diseluruh tinggi penampang, dari nilai maksimum pada sumbu berat balok ke nilai nol ditepi atas dan bawah balok. Tegangan geser horisontal ini juga bervariasi di sepanjang bentang balok (khususnya apabila tegangan lentur sepanjang bentang bervariasi).

Ekspresi eksak untuk tegangan geser horisontal balok, yang didasarkan atas konsep serupa dengan yang disebutkan terdahulu, dapat ditentukan. Tegangan geser horisontal pada lapisan sejauh y dari sumbu netral dapat dibuktikan mempunyai bentuk $f_s = \frac{VS}{Ib}$, dimana V adalah gaya geser vertikal, S adalah statis momen, I adalah inersia dan b adalah lebar. Persamaan umum diatas dapat digunakan untuk berbagai jenis penampang. Untuk penampang segi empat, tegangan geser maksimum terjadi pada sumbu netral balok (setengah tinggi) $v_{max} = \frac{3}{2}v_{avg}$, dimana a dan b adalah dimensi penampang melintang. Dengan demikian tegangan geser maksimum pada penampang balok adalah 1,5 kali tegangan geser rata - rata penampang balok segi empat.



Gambar 2.10. Distribusi tegangan geser pada penampang balok segiempat.
 (Sumber : Winter, G & H. N, Artur, " *Design Of Concrete Structures* " 9-th ed. McGraw.Hill International, 1981, gambar 2.15, hal 74)

2.6.3. Tegangan dan Lendutan Akibat Beban Tumbukan

Apabila suatu balok pada tumpuan sederhana dikenai beban tumbukan dari ketinggian h (gambar 2.6.4) maka tegangan yang terjadi bukan hanya karena berat dari penumbuk itu tetapi harus diperhitungkan juga tegangan akibat adanya tumbukan dari suatu masa memiliki kecepatan $[R, \text{Kinasoshvili}][20]$. Pada saat ini, dengan mengasumsikan bahwa masa dari balok diabaikan dibandingkan dengan masa dari benda jatuh dan balok tidak mengalami tegangan melebihi tegangan batasnya. Sehingga tidak ada kehilangan energi ketika tumbukan terjadi dan kerja

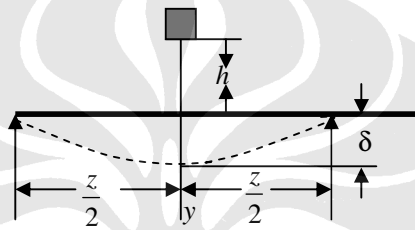
total oleh berat benda W ketika jatuh seutuhnya dirubah menjadi energi regangan dari lenturan balok. Apabila kurva lendutan akibat tumbukan mempunyai bentuk yang sama dengan lendutan statis, maka gaya yang ditimbulkan yaitu :

$$P = \delta \cdot \frac{48EI_z}{l^3} \quad (2.27)$$

Energi total yang terjadi di balok adalah sebanding terhadap energi oleh gaya P ;

$$U = \frac{P\delta}{2} = \delta^2 \frac{24EI_z}{l^3} \quad (2.28)$$

Jika h adalah tinggi jatuh sebelum tumbukan, maka persamaan untuk energi yaitu



Gambar 2.11. Lendutan balok akibat impak

(Sumber : Timoshenko, S., " *Strength of materials* " 3-rd ed. Krieger Publishing, 1955, gambar 272, hal 320)

$$W(h + \delta) = \delta^2 \frac{24EI_z}{l^3} \quad (2.29)$$

Dari persamaan diatas didapatkan

$$\delta = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + \frac{1}{g} \delta_{st} v^2} \quad (2.30)$$

Dimana ,

$$\delta_{st} = \frac{Wl^3}{48EI_z} \quad \text{dan} \quad v = \sqrt{2gh} \quad (2.31)$$

Apabila diganti dengan variabel h ,

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2\delta_{st} h} \quad (2.32)$$

Tegangan statis maksimum pada tengah bentang

$$\sigma_{st} = \frac{M}{Z} = \frac{Pl^3}{4Z} \quad (2.33)$$

Maka tegangan statis dan dinamis maksimum adalah sebanding dengan lendutan statis dan dinamikanya, yaitu:

$$\sigma_d = \sigma_{st} \frac{\delta_d}{\delta_{st}} = \frac{Pl}{4Z} \left(\frac{\delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2\delta_{st}h}}{\delta_{st}} \right) \quad (2.34)$$

2.7. KERUSAKAN BETON

Kerusakan pada beton pasti akan terjadi, terutama sekali yang berkaitan dengan umur bangunan. Jenis kerusakan yang terjadi pada beton ini perlu diketahui, hal ini akan menentukan metode perbaikan apa yang paling sesuai, disamping memperhatikan pada tujuan yang ingin dicapai dalam perbaikan betonnya.

Beberapa jenis kerusakan pada beton dan penyebabnya antara lain :

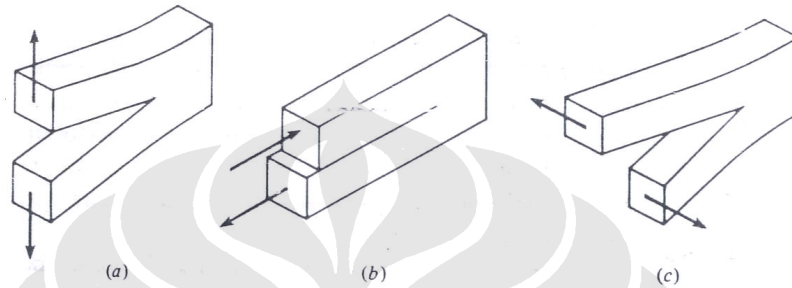
- (a) Kekeroposan beton, terjadi karena pelaksanaan yang kurang sempurna.
- (b) Disintegrasi dan pelapukan terjadi karena pengaruh lingkungan yang agresif, terjadi proses korosif.
- (c) Erosi Beton, biasanya terjadi pada bangunan-bangunan air, pavement untuk jalan raya.
- (d) Retak-retak, sebagai akibat dari adanya pembebanan lebih, susut, penurunan dari komponen struktur yang berbeda.

2.7.1. Retak pada beton

Retak-retak pada beton dapat terjadi sebagai akibat dilampauinya kemampuan beton menahan tegangan yang terjadi dimana tegangan tersebut dapat menimbulkan mode retak yang berbeda tergantung dari jenis tegangan yang terjadi. Jenis tegangan yang terjadi pada suatu struktur tentunya tergantung dengan

beban luar yang berlaku pada struktur tersebut apakah beban yang menyebabkan tegangan lentur, geser, ataupun torsi.

Untuk lebih jelasnya pada gambar dibawah ini dijelaskan 3 mode dari cara merambatnya retak, dimana mekanisme ketiga mode ini sangat menentukan besarnya tegangan di sekeliling ujung retak.



The three modes of cracking: (a) mode I, (b) mode II, and (c) mode III.

Gambar 2.12. Tiga Mode retak

(Sumber : Kare Hellan, "Introduction to fracture mechanics", International student edition, 1984, Gambar 3.1, Hal 145)

Mode bukaan retak akibat beban dapat terjadi dengan 3 jenis mode, yaitu :

- (a) Mode I (*opening mode*) adalah retak yang terjadi karena tegangan tarik.
 - (b) Mode II (*sliding mode*) adalah retak yang terjadi karena tegangan geser.
 - (c) Mode III (*tearing mode*) adalah retak yang terjadi karena geser melintang.
- [Kare Hellan][19].

Dengan adanya retak yang berlebihan kemampuan struktur beton akan berkurang atau menurun apalagi pada bagian yang terjadi retak dimana pada bagian tersebut akan terjadi konsentrasi tegangan.

Pada keadaan lain retak akan berakibat adanya proses korosi pada baja beton. Akhirnya tegangan-tegangan yang terjadi dapat melebihi kemampuan daya dukung dari baban-bahan yang dipakai.

Retak yang timbul disaat beton telah mengeras biasanya terjadi akibat adanya beban yang berlebih (*over load*). Selain itu terdapat juga retak yang diakibatkan oleh susut, perbedaan panas pada bagian-bagian beton.

Mengingat sifat beton yang elastis-plastis (getas) kejadian retak ini tidak bisa dihindari, untuk itu perlu dibatasi lebar retaknya (perhatikan Tabel 2.2).

No	Keadaan Bangunan	Lebar Retaks Maks (mm)
1.	Beton didalam ruang bangunan	
	a. Keadaan keliling non korosif	0.3
	b. Keadaan keliling Korosif	0.2
2.	Beton diluar ruang bangunan	
	a. Terlindung dari hujan dan terik matahari	0.2
	b. Tidak terlindung, kontinyu berhubungan dengan air dan tanah atau berada pada lingkungan agresif	0.1

Tabel 2.2. Batasan Lebar Retak Menurut PBI 1971

2.8 PERBAIKAN BETON DENGAN INJEKSI

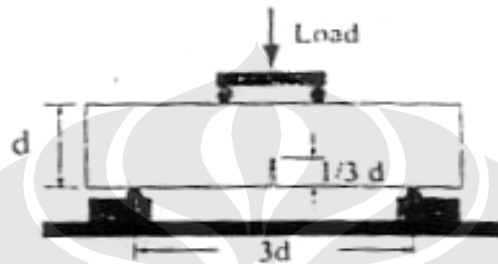
Injeksi beton merupakan teknik yang umum digunakan dalam memperbaiki material dan struktur beton yang rusak terutama akibat retak. Hasil evaluasi efektifitas dari injeksi beton tentunya dipengaruhi oleh desain benda uji dan metode pengujiannya. Terutama jenis, ukuran benda uji dan kondisi batas dalam pengujian, dimana akan mempengaruhi hasil pengujian.

Epoksi adalah salah satu material yang umum digunakan untuk injeksi retak pada beton karena kekentalannya rendah sehingga bisa menjangkau celah sempit pada retak, daya ikat tinggi, mudah keras.

Menurut penelitian oleh M. Kuneida (1989) memperlihatkan bahwa kuat lentur dan energi keruntuhan dari beton hasil perbaikan dengan epoksi jenis *low viscosity* adalah menjadi lebih besar dari beton awal.

Penelitian lain juga dilakukan oleh T. Kamada (2001) dengan menggunakan 4 balok spesimen yang bervariasi ketinggiannya yaitu 100, 200, 300 mm dengan kondisi terdapat coakan lebar 0.3 mm dengan ketinggian 1/3 dari tinggi balok.

Pengujian kuat lentur dilakukan dengan 4 titik pembebanan dimana beban dengan (CMOD) lebar bukaan mulut retak sewaktu pengujian diukur lalu dianalisa. Setelah benda uji retak, diperbaiki menggunakan teknik injeksi dengan epoksi lalu dilakukan pengujian kembali dan dibandingkan hasilnya.

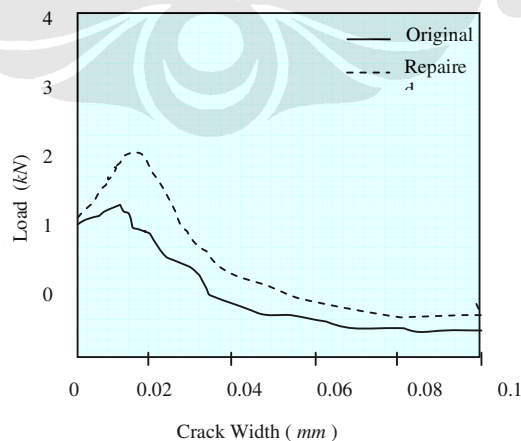


Gambar 2.13. Skematik pengujian balok awal dan hasil perbaikan

(sumber :Kamada, T, Kunieda, M, "Flexural Failure Behaviour of Concrete Beams Repaired by Crack Injection Techniques" Fracture Mechanis, de Borst et al, 2001)

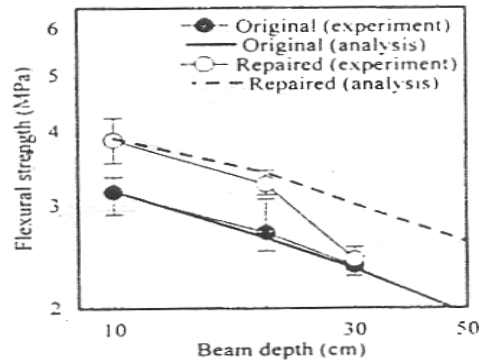
2.8.1 Hasil Pengujian Kamada et al

Dari hasil pengujian didapat kurva load – CMOD yang memperbandingkan antara hasil pengujian original spesimen dan spesimen perbaikan dimana kuat lentur specimen hasil perbaikan lebih tinggi dari beton original seperti tampilan grafik pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.14. Beban vs Lebar Retak pada balok awal dan hasil perbaikan

(sumber :Kamada, T, Kunieda, M, "Flexural Failure Behaviour of Concrete Beams Repaired by Crack Injection Techniques" Fracture Mechanis, de Borst et al, 2001)



Gambar 2.15. Pengaruh pembebanan pada kuat lentur pada balok awal dan hasil perbaikan

(sumber :Kamada, T, Kunieda, M, "Flexural Failure Behaviour of Concrete Beams Repaired by Crack Injection Techniques" Fracture Mechanis, de Borst et al, 2001)

Dari gambar 2.15. dapat dilihat kuat lentur dari benda uji hasil perbaikan dimana celah retak diinjeksi menggunakan epoksi adalah lebih besar dari benda uji awal pada percobaan pengujian yang sama. Kuat ikat pada persinggungan antara bahan perbaikan dengan beton merupakan kinerja utama dalam perkuatan beton hasil perbaikan.

2.9. POLIMER RESIN EPOKSI

Bahan bangunan sintetik (plastik) diolah dengan memanfaatkan senyawa bahan organis molekul bahan plastik/polimer. Polimer merupakan nama teknik dari plastik yaitu molekul yang besar sekali yang terjadi melalui pengikatan molekul-molekul kecil (*monomere*) akan diikat sehingga menjadi molekul-molekul besar (*polimer*).

Secara garis besar ada 2 bagian yaitu :

1. Polimer Termoplastik

Mempunyai struktur molekuler linier dan dapat diinjeksikan ke dalam cetakan selagi panas oleh karena polimer termoplastik apabila pada suhu tinggi akan mencair. Termoplas digunakan dalam pembangunan profil-profil plastik seperti pipa, talang, dan sebagainya.

Contohnya : Resin PVC, Polipropilen, Polistiren

2. Polimer Termoset

Polimer jenis ini digunakan dalam pembangunan untuk bahan yang tidak dapat dilebur kembali. Agar bahan termoset dapat terpolimerisasi dan mengalami perubahan bentuk menjadi keras perlu adanya penggabungan antara epoksi dan hardener.

Contohnya : Resin Fenol, Resin Urea, Resin Epoksi, Resin Poliester

Untuk lebih jelasnya sifat dari bahan epoksi dapat dilihat pada tabel dibawah ini

Properties of polyester and epoxide laminates

	Polyester reinforced with chopped glass mat	Polyester reinforced with plainweave glass fabric	Polyester reinforced with carbon fibre	Epoxide reinforced with plainweave glass fabric	Epoxide reinforced with carbon fibre
Reinforcement content (per cent)	25-35	60-65	40	60-65	60
Density ($\text{kg/m}^3 \times 10^{-3}$)	1.5-1.6	1.8	1.54	1.8	1.5
Tensile strength (MN/m^2)	70-105	140-300	720	200-420	1100-1350
E (GN/m^2)	5.5-12.5	7-20	150	21-25	125-150

Tabel.2.3. Properti dari Poliester & Epoksi

(sumber :John, V.B "Introduction to Engineering Materials 2nd edition")