

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan

Beton yaitu berasal dari kata concrete dalam bahasa Prancis Jerman, Hongaria, Rumania, Rusia, dan sebagainya. Hal ini dikemukakan John S. Scott dalam kamus lengkap teknik sipil dengan penerjemah Ir. Trigunadi BSL dan Ir. Dhanny Andijaya tahun 1993.

Menurut Edward G. Nawy seorang distinguished Professor teknik sipil dan lingkungan Rutgers University, The State University of New Jersey dalam bukunya yang diterjemahkan Ir. Bambang Suryoatmono, Ph.D. dari teknik sipil, universitas Parahyangan, Bandung, didalam bukunya dengan judul Beton Prategang suatu pendekatan dasar jilid 1, edisi ketiga, pada halaman 1, mengutarakan bahwa beton adalah material yang kuat dalam kondisi tekan, tetapi lemah dalam kondisi tarik: kuat tariknya bervariasi dari 8 sampai 14 persen dari kuat tekannya.

Pada umumnya, tinggi komponen struktur beton prategang berkisar antara 65 sampai 80 persen dari tinggi komponen struktur beton bertulang. Dengan demikian, komponen struktur prategang membutuhkan lebih sedikit beton, dan sekitar 20 sampai 35 persen banyaknya tulangan. Apabila bentang balok dari beton bertulang melebihi 70 sampai 90 ft, maka beban mati berlebihan, balok tersebut menjadi sangat berlebihan, yang menghasilkan komponen struktur yang lebih berat dan, akibatnya, retak dan defleksi jangka panjang yang lebih besar. Jadi, untuk bentang panjang, beton prategang merupakan keharusan karena

pembuatan pelengkung mahal dan tidak dapat berperilaku dengan baik akibat adanya rangkai dan susut jangka panjang yang dialaminya.

2.2 Defenisi Beton Prategang (Prestressed Concrete)

Menurut kamus lengkap teknik sipil edisi ke empat dengan karangan John S. Scott halaman 509 dengan penerbit Airlangga tahun 1993, mengemukakan bahwa prestressed concrete, adalah disebut juga beton pratekan , yang berarti beton yang gaya retak dan tariknya dihilangkan atau diturunkan dengan menekannya oleh kabel yang diregangkan di dalamnya, atau oleh tekanan tembok tumpuan. Dua metode utama menggunakan batang atau kabel di dalam beton: yaitu pascatarik dan pratarik. Beton pratekan lebih ekonomis untuk bentangan yang panjang atau ketinggian baloknya dikurangi sampai minimum.

2.3 Sistem Prategang Pre-tension Dan Post-tension

A. Sistem Pre-tension

Pre-tension adalah pratarik berarti pemberian pratarik pada baja prategang, yang diberikan pada masing-masing tendon, bukan pada baloknya. Dengan demikian, balok pratarik adalah balok prategang di mana tendon prategang yang ditarik sebelum dicor.

Cara pemberian pratarik biasanya dilakukan di lokasi pembuatan beton pracetak, di mana landasan (bed) pracetak berupa slab beton bertulang yang panjang dicor di atas tanah dengan bulkheads angker vertikal atau dinding di ujung-ujungnya. Strand baja diregangkan dan diangker ke dinding vertikal, yang didesain untuk menahan gaya prategang eksentrisitas besar. Pemberian prategang

dapat dilakukan dengan memberi prategang pada strand secara individual, atau semua strand pada satu operasi pendongkrakan. Strand prategang yang diekspos di antaranya dapat dipotong setelah beton mengeras.

B. Sistem Post-tension

Post-tension adalah pascatarik berarti pemberian pascatarik, strand, kawat-kawat, atau batang-batang ditarik sesudah beton mengeras.

Pemberian pascatarik ini ada dua cara:

1. Cara pascatarik strand pada beton precast balok segmental
2. Cara pascatarik strand pada beton cor monolit sepanjang bentang girder dengan cast in place. Cara inilah yang dilakukan pada proyek pembangunan Fly over Jamin Ginting yang sedang dikerjakan sampai tahun 2015 ini.

2.4 Material Dan Sistem Untuk Pemberian Prategang

Dalam pemilihan material dan sistem prategang perlu dipilih mutu tinggi.

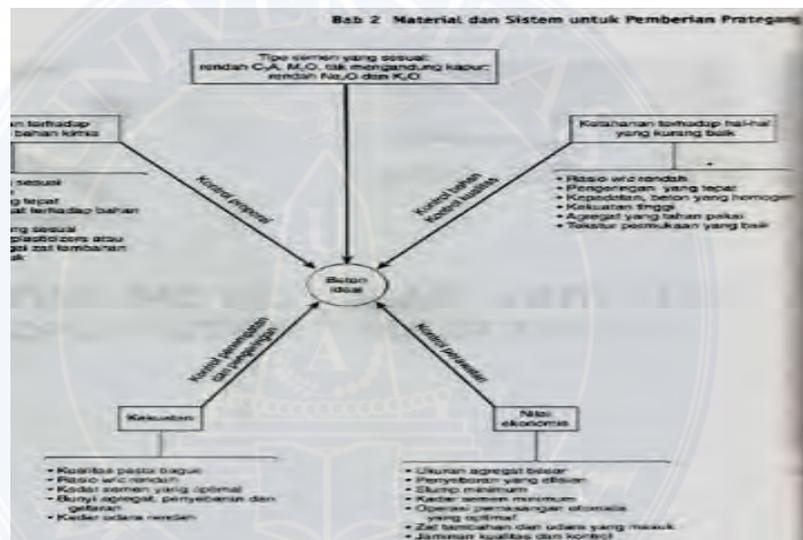
Pembahasan ditujukan untuk meninjau topik-topik yang berkaitan dengan beton dan baja prategang, sebagai berikut:

2.4.1 Beton

Beton, khususnya beton mutu tinggi, adalah komponen utama dari semua elemen beton prategang. Dengan demikian, kekuatan dan daya tahan jangka panjang beton prategang harus diperoleh dengan menggunakan jaminan kualitas dan control kualitas yang memadai pada tahap produksinya. Berikut ini hal-hal yang perlu diperhatikan dalam beton.

1. Parameter-parameter yang mempengaruhi kualitas beton

Kekuatan dan daya tahan adalah dua kualitas utama yang paling penting di struktur beton prategang. Efek –efek jangka panjang dapat dengan cepat mengurangi gaya-gaya prategang dan dapat menyebabkan kegagalan yang tidak diharapkan. Dengan demikian, banyak upaya yang telah diambil untuk menjamin ketatnya jaminan kualitas dan control kualitas pada berbagai tahap produksi dan konstruksi serta perawatan, hal ini dapat dilihat pada gambar 2.1 yang menunjukkan berbagai faktor yang menghasilkan beton berkualitas baik.



Gambar 2.1 Sifat utama beton yang baik

Sumber : Beton prategang, Edward G.Nawy, jilid 1 edisi ketiga.

2. Nilai besaran –besaran beton yang telah keras

Besaran-besaran mekanis beton yang telah keras dapat dikelompokkan menjadi dua kategori: besaran sesaat atau jangka pendek dan besaran jangka panjang. Besaran jangka pendek adalah kekuatan tekan, tarik dan geser, serta kekakuan, sebagaimana diukur dengan modulus elastisitas. Besaran jangka

panjang dapat diklasifikasikan dalam rangkai dan susut. Berikut ini dibahas rincian mengenai besaran-besaran tersebut.

a. Kuat tekan

Kuat tekan beton bergantung pada jenis campuran, besaran agregat dan waktu serta kualitas perawatan, kuat tekan beton dapat mencapai 20.000 psi atau lebih. Produksi komersial beton dengan agregat biasa biasanya hanya mencapai 4000 sampai 12.000 psi, dengan kuat beton yang paling umum adalah 6000 psi.

Kuat tekan f_c' didasarkan atas silinder standard 6in.x12 in. Ini diolah pada kondisi laboratorium standard dan diuji pada laju pembebanan tertentu selama 28 hari. Spesifikasi standard yang digunakan di Amerika serikat biasanya diambil dari ASTM C-39. Kekuatan beton pada struktur actual dapat tidak sama dengan kekuatan silinder karena adanya perbedaan pada kondisi pemadatan dan pengolahan.

Untuk uji kekuatan, ACI menetapkan penggunaan rata-rata dari dua silinder sampel yang sama yang diuji pada tempo yang sama, yang biasanya adalah 28 hari. Mengenai frekuensi pengujian, ACI menetapkan bahwa kekuatan masing-masing kelas beton dapat dipandang memadai apabila (1) rata-rata dari semua set dari tiga uji kekuatan yang berurutan sama atau melebihi f_c' yang dibutuhkan, dan (2) tidak ada hasil uji kekuatan individual (rata-rata dua silinder) yang lebih rendah dari f_c' melebihi 500 psi. Kekuatan rata-rata campuran beton yang didesain harus melebihi f_c' dengan nilai tertentu yang bergantung pada keseragaman produksi yang direncanakan. Dengan demikian f_c' desain tidak sama dengan kekuatan silinder rata-rata, melainkan kekuatan silinder yang dipandang minimum.

b. Kuat Tarik

Kuat tarik beton relative kecil. Pendekatan yang baik untuk kuat tarik f_{ct} adalah $0,10 f_c' < f_{ct} < 0,20 f_c'$. Kuat tarik lebih sulit diukur dibandingkan dengan kuat tekan karena adanya masalah penjepitan pada mesin-mesin tarik. Ada sejumlah metode untuk menguji kuat tarik, yang paling umum adalah pembelahan silinder, atau uji Brazilian.

Untuk komponen struktur yang mengalami lentur, nilai modulus raktur (modulus of rupture) f_r (bukan kuat belah tarik f_t'), digunakan dalam desain. Modulus raktur diukur dengan menguji balok beton polos berpenampang bujur sangkar 6 in., hingga gagal, dengan bentang 18 in., dan dibebani di titik-titik sepertiga bentang (ASTM C-78). Modulus raktur mempunyai nilai yang lebih tinggi dibandingkan kuat tarik belah. ACI menetapkan nilai $7,5 \sqrt{f_c'}$ untuk modulus raktur beton normal.

Beton ringan pada umumnya mempunyai kuat tarik lebih rendah dibandingkan beton normal. Berikut ini ketentuan mengenai beton ringan:

1. Jika kuat tarik belah f_{ct} ditetapkan, maka

$$f_r = 1,09 f_{ct} \leq 7,5 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots$$

(2.1)

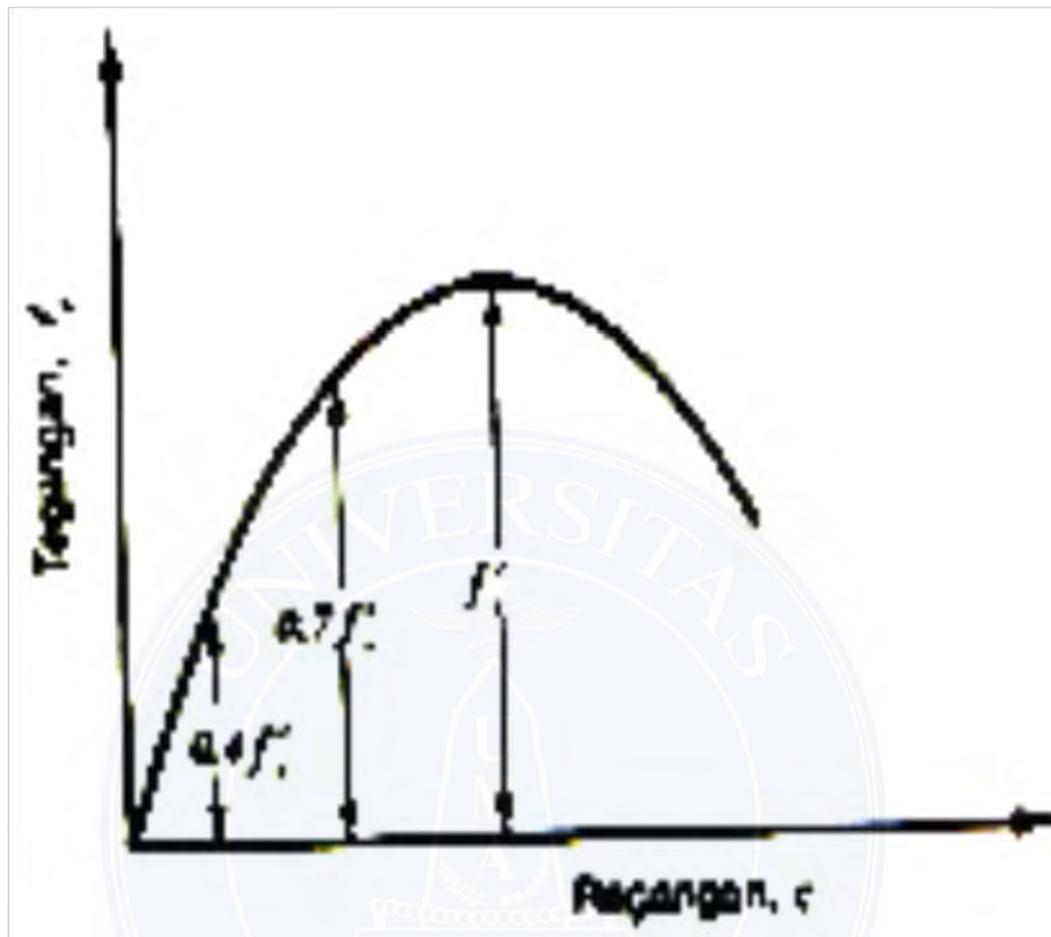
2. Jika f_{ct} tidak ditetapkan, gunakan faktor 0,75 untuk semua beton ringan dan 0,85 untuk beton ringan pasir. Interpolasi linier dapat digunakan untuk campuran antara agregat halus ringan dan pasir alami.

c. Kuat Geser

Kuat geser lebih sulit untuk ditentukan secara eksperimental dibandingkan dengan pengujian-pengujian lain yang telah dibahas di atas karena sulitnya mengisolasi tegangan geser dari tegangan-tegangan lainnya. Ini merupakan alasan adanya variasi yang sangat besar dalam nilai kuat geser yang dilaporkan dalam literature, yang bervariasi dari 20 persen kuat tekan untuk untuk pembenanan normal hingga persentase yang sangat besar (sampai 85 persen) dari kuat tekan pada kasus-kasus di mana geser langsung terjadi bersamaan dengan tekan. Kontrol desain struktural jarang sekali berdasarkan pada kuat geser karena tegangan geser harus dibatasi secara kontiniu pada nilai yang lebih kecil untuk mencegah beton mengalami tarik diagonal.

3. Kurva Tegangan-Regangan Beton

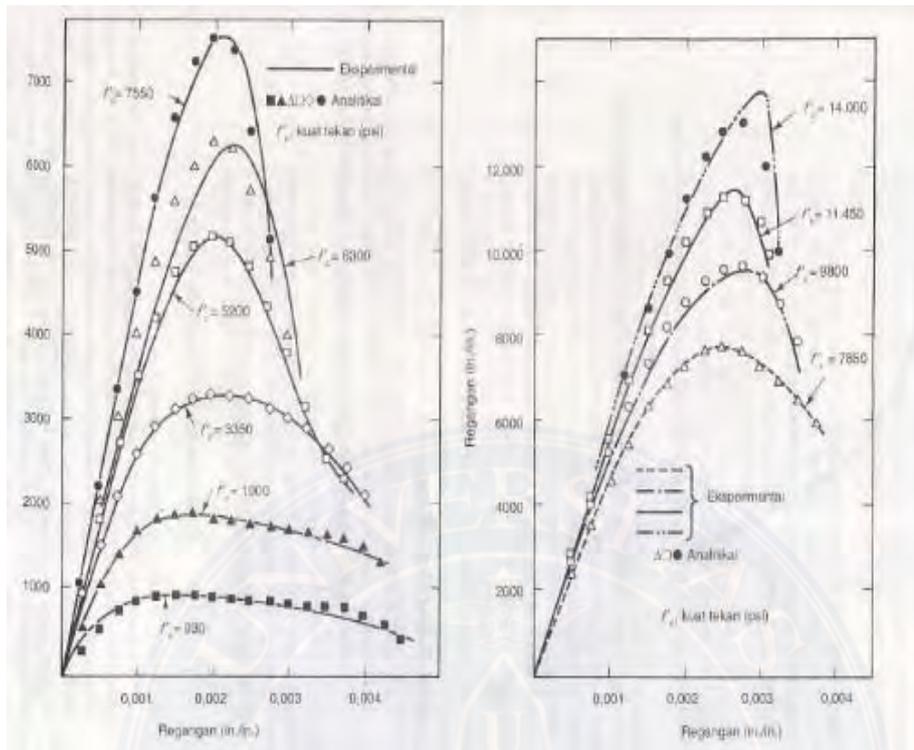
Hubungan tegangan-regangan beton merupakan hal penting dalam mengembangkan analisis dan desain serta prosedur-prosedur dalam struktur beton. Hal ini dapat dilihat dalam kurva, gambar 2.2 menunjukkan kurva tegangan-regangan yang diperoleh dari pengujian dengan menggunakan benda uji beton silinder yang dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit. Yang terlihat dari kurva, bagian pertama mencapai 40 persen dari kuat ultimit f_c' , ini dapat dianggap linier untuk semua tujuan praktis. Sesudah sekitar 70 persen dari tegangan gagal, material kehilangan sebagian besar kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram. Pada saat beban ultimit, retak sejajar arah pembebanan menjadi sangat terlihat, dan hampir semua silinder (kecuali yang kekuatannya sangat rendah) akan tiba-tiba gagal sesaat setelah itu.



Gambar 2. 2 Kurva tegangan-regangan tipikal untuk beton

sumber : Buku Beton Prategang Edward G.Nawy 2001 jilid 1

Gambar 2.3 menunjukkan kurva tegangan –regangan beton dengan dengan berbagai kekuatan yang dilaporkan oleh Portland Cement Association. Terlihat bahwa (1) semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan gagalnya, (2) panjang bagian yang semula relative linier akan bertambah untuk kuat tekan beton yang semakin besar, dan (3) ada reduksi yang sangat nyata pada daktilitas untuk kekuatan yang meningkat.



Gambar 2.3 Kurva tegangan-regangan untuk berbagai kekuatan beton

sumber: Beton Prategang Edward G.Nawy 2001, jilid 1,

4. Modulus Elastisitas dan Perubahan Kekuatan Tekan Terhadap Waktu

Pada Gambar 2.4 menunjukkan kurva tegangan –regangan berbentuk kurvalinier pada taraf pembebanan yang sangat awal, maka modulus elastisitas yang dapat diterapkan hanya pada tangen dari kurva dititik asal. Kemiringan awal dari tangen di kurva didefinisikan sebagai modulus tangen awal, dan modulus tangent di titik lain pada kurva juga dapat saja dibuat. Kemiringan garis lurus yang menghubungkan titik asal dengan tegangan tertentu sekitar $0,4 f_c'$ merupakan modulus elastisitas sekan beton. Nilai ini disebut modulus elastisitas dalam perhitungan desain, memenuhi asumsi praktis bahwa regangan yang terjadi

selama pembebanan pada dasarnya dapat dianggap elastis (dapat pulih kembali seluruhnya jika beban dihilangkan), dan bahwa regangan selanjutnya akibat bekerjanya beban disebut rangkak.

Standar ACI untuk gedung menetapkan rumus berikut untuk menghitung modulus elastisitas sekan beton E_C

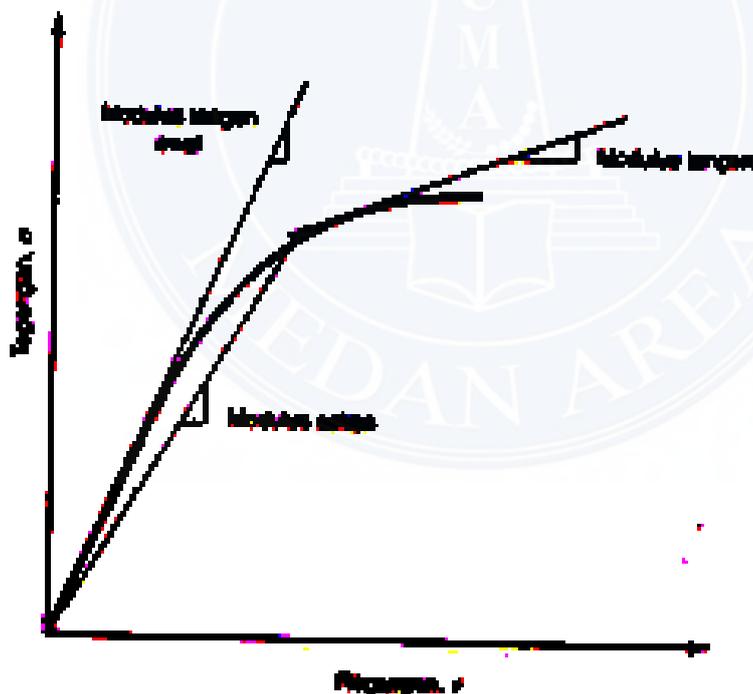
$$E_C = 33w_c^{1,5} \sqrt{f_c'} \text{ untuk } 90 < w_c < 155 \text{ lb/ft}^3 \dots\dots\dots(2.2a)$$

Dimana w_c adalah densitas beton dalam satuan lb/ ft³ (1 lb/ft³= 16,02 kg/m³) dan f_c' adalah kuat tekan silinder dalam psi. Untuk beton normal

$$E_C = 57.000 \sqrt{f_c'} \text{ psi (4700}\sqrt{f_c'} \text{ Mpa)}$$

atau $E_C = 0,043w^{1,5} \sqrt{f_c'} \text{ (Mpa)}\dots\dots\dots$

(2.2b)



Gambar 2. 4 Modulus tangen dan modulus sekan pada beton.

sumber: beton prategang, Edward G.Nawy 2001 jilid 1

5. Beton Mutu Tinggi

Yang disebut beton mutu tinggi menurut ACI 318 adalah yang mempunyai kuat tekan silinder melebihi 6000 psi (41,4 MPa). Untuk beton dengan kuat tekan antara 6000 sampai 12.000 psi (42-84 Mpa), rumus untuk modulus elastisitas adalah

$$E_c \text{ (psi)} = [40.000 \sqrt{f_c'} +] 10^6] \frac{W_c}{145} \wedge 1,5$$

.....(2.3a)

di mana f_c' dalam psi dan W_c dalam lb/ft³, atau

$$E_c \text{ (psi)} = [3,32 \sqrt{f_c'} + 689] 5] \frac{W_c}{2320} \wedge 1,5$$

.....(2.3b)

di mana f_c' dalam MPa dan W_c dalam kg/m³.

Dewasa ini, kuat beton sampai 20.000 psi (138 MPa) dapat dengan mudah diperoleh dengan menggunakan ukuran agregat batu maksimum 3/8 in (9,5 mm) dan bahan pengganti sebagian semen pozzolamic cementitious seperti silica fume. Kekuatan setinggi ini dapat diperoleh di lapangan pada control kualitas dan kondisi jaminan kualitas yang amat ketat. Untuk kekuatan di antara 20.000 dan 30.000 psi (138-206 MPa), material lain seperti serat baja atau karbon harus ditambahkan ke dalam campuran. Dalam semua kasus tersebut, desain campuran harus dilakukan dengan beberapa trial batches di lapangan (lima atau lebih), dengan memodifikasi komponen campuran untuk kemudahan pengerjaan dalam pengecoran beton.

Contoh yang baik mengenai penggunaan beton mutu tinggi di dalam selang 20.000 psi (138 MPa) pada 56 hari dan modulus beton $E_c = 7,8 \times 10^6$ psi

(5,38 x 103 MPa). Campuran tipikal aktual yang diperoleh dicantumkan dalam tabel 2. 1, dengan nilai campuran desain di dalam tanda kurung.

Nilai slump sebesar 8 in. Dengan rasio air/semen (w/c) ~ 0,22 diperoleh untuk campuran yang disebutkan dalam tabel tersebut. Plot tipikal tekan versus lama waktu (umur) untuk campuran tersebut yang didasarkan atas uji silinder 4 in. x 8 in. terlihat dalam gambar 2.5

Tabel 2.1 Proporsi campuran untuk $f_c' > 18.000$ psi

| Agregat kasar (3/8 in.) | Agregat halus (pasir lapis jalan) | semen | air | Silica fume | Super plasticizer | |
|----------------------------|--------------------------------------|-------|--------------------|----------------------|------------------------------|---------------|
| | | | | | W. R. Grace Dartard 40 | Mighty 150 |
| (lb) | (lb) | (lb) | (lb) | (gal) | Oz/100 | lb semen |
| 1872 | 1165 | 957 | 217 | 13 | 2,1 | 9,8 |
| 1894 | 1165 | 956 | 217 | 13 | 2,1 | 16,4 |
| (1805) | (1100) | (950) | (air/semen = 0,22) | (70 lb) ^a | (6,0) | (sampai 24) |

^a berat silica fume padat saja. Air yang terkandung sebagai bagian dari emulsi harus dikurangkan dari air total yang diperkenankan.

sumber: beton prategang, Edward G.Nawy 2001 jilid 1

Penelitian belakangan ini di Rutgers mengenai komposit bermutu tinggi telah menghasilkan perkembangan yang amat banyak di dalam hal daktilitas balok beton bertulang bermutu tinggi. Prisma beton prategang dari beton mutu tinggi digunakan sebagai ganti dari batang tulangan baja lunak normal. Proporsi campuran dalam lb/yd³ ditunjukkan dalam tabel 2.2. Campuran tersebut didesain untuk kuat tekan tujuh hari sebesar 12.000 psi 984 MPa). Rasio antara sementasi/

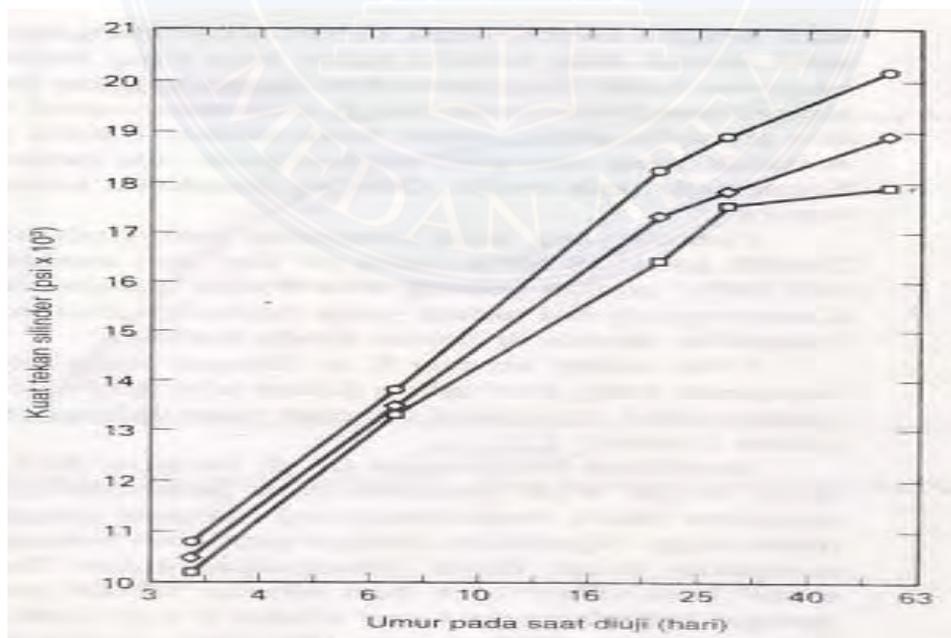
agregat halus/agregat kasar adalah 1: 1,22: 2,06 dan nilai slump-nya bervariasi antara 4 sampai 6 in. (100 sampai 150 mm). Strand prategang adalah stress-relieved 270 K (1900 MPa) 7 kawat berdiameter 3/8 in. (9,5 mm).

Tabel 2.2 Proporsi campuran dalam lb/yd³ untuk balok komposit dengan $f_c' > 13000$ psi

| Agregat kasar 3/8 in. (1) | Agregat halus (pasir alami). (2) | Semen Portland Tipe III (3) | Air (4) | Serbuk silika fume (5) | Super plasticizer (6) |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|------------------------|-----------------------|
| 1851 | 1100 | 720 | 288 | 180 | 54 |

1 lb /yd³ = 0,59 kg/m³

sumber: beton prategang, Edward G.Nawy 2001 jilid 1



Gambar 2.5 Kuat tekan versus umur pada beton mutu tinggi

sumber : Beton Prategang, E.G.Nawy,2001; jilid 1

6. Modulus Dan Kekuatan Tekan Awal

Karena pada umumnya pemberian tegangan pada suatu elemen dilakukan sebelum beton mencapai kekuatan 28 hari, perlu ditentukan kuat tekan beton f_c' pada taraf prategang, begitu pula modulus beton E_c pada berbagai taraf riwayat pembebanan elemen tersebut. Rumus umum untuk menghitung kuat tekan sebagai fungsi dari waktu adalah

$$f_{ci}' = \frac{t}{\alpha + \beta t} f_c' \dots\dots\dots (2.4a)$$

di mana f_c' = kuat tekan 28 hari

t = waktu (hari)

α = faktor yang bergantung pada tipe semen dan kondisi perawatan

= 4,00 untuk semen tipe I yang dirawat basah dan 2,30 untuk semen tipe III yang dirawat basah

= 1,00 untuk semen tipe I yang dirawat uap dan 2,30 untuk semen tipe III yang dirawat uap

β = faktor yang bergantung pada parameter-parameter yang sama dengan nilai masing – masing 0,85; 0,92; 0,95 dan 0,98.

Dengan demikian, untuk semen tipe I yang dirawat basah,

$$f_{ci}' = \frac{t}{4,00 + 0,85t} f_c' \dots\dots\dots (2.4b)$$

Modulus beton efektif E_c' adalah

$$E_c' = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan elastis} + \text{regangan rangkai}} \dots\dots\dots (2.5)$$

dan modulus efektif ultimit adalah

$$E_{cn} = \frac{Ec}{1+\gamma_t} \dots\dots\dots (2.6a)$$

di mana γ_t adalah rasio rangkak yang didefinisikan sebagai

$$\gamma_t = \frac{\text{regangan rangkak ultimit}}{\text{regangan elastis}}$$

Rasio rangkak γ_t mempunyai limit atas dan bawah untuk beton kualitas prategang sebagai berikut

$$\text{Atas : } \gamma_t = 1,75 + 2,25 \left(\frac{100-H}{65} \right) \dots\dots\dots (2.6b)$$

$$\text{Bawah : } \gamma_t = 0,75 + 0,75 \left(\frac{100-H}{50} \right) \dots\dots\dots (2.6c)$$

di mana H adalah kelembaban dalam persen.

Rumus –rumus di atas hanya berlaku secara umum karena nilai modulus elastisitas dipengaruhi oleh berbagai factor selain beban, misalnya kadar air di dalam benda uji beton rasio air/semen, umur beton, dan temperature. Dengan demikian, untuk struktur kusus seperti pelengkung, terowongan, modulus elastisitas harus ditentukan dari hasil pengujian.

Hanya ada sedikit penelitian mengenai penentuan modulus elastisitas tarik karena kuat tarik beton yang rendah biasanya diabaikan dalam perhitungan. Namun, untuk batas-batas tertentu di atas, modulus elastisitas tarik dapat saja diasumsikan sama dengan tekan.

7. Rangkak

Rangkak, atau aliran material lateral, adalah peningkatan regangan terhadap waktu akibat beban yang terus menerus bekerja. Deformasi awal akibat beban adalah regangan elastic, sementara regangan tambahan akibat beban yang sama yang terus bekerja adalah regangan rangkak. Asumsi praktis seperti ini

cukup dapat diterima karena deformasi awal yang tercatat hanya berupa sedikit efek yang bergantung pada waktu.

Rangkak tidak dapat diamati secara langsung dan hanya dapat ditentukan dengan mengurangkan regangan elastic dan regangan susut dari deformasi total. Meskipun susut dan rangkakan merupakan fenomena yang tidak independen, dapat diasumsikan bahwa superposisi regangan berlaku; jadi,

Regangan total (ϵ_t) = regangan elastis (ϵ_e) + rangkakan (ϵ_c) + susut (ϵ_{sh}).

Sebagai contoh, nilai-nilai numeric regangan akibat ketiga factor untuk benda uji beton normal yang mengalami tekan 900 psi adalah sebagai berikut:

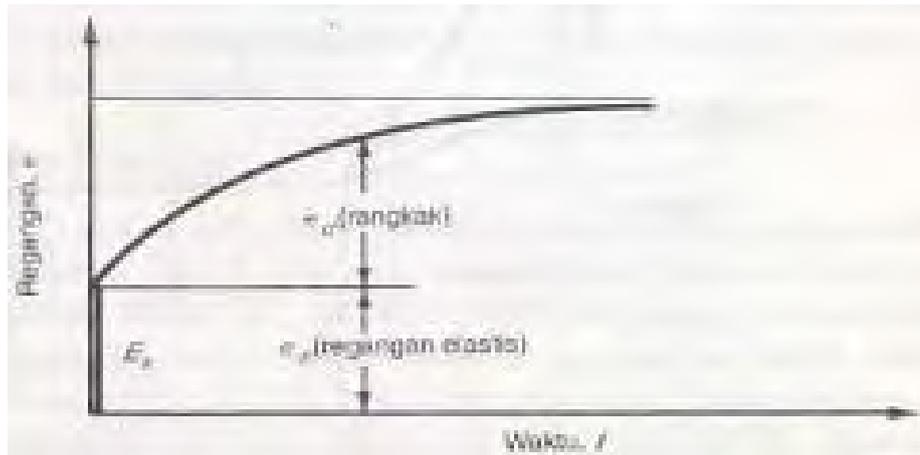
Regangan elastis segera, ϵ_e = 250×10^{-6} in./in.

Regangan susut setelah 1 tahun, ϵ_{sh} = 500×10^{-6} in./in.

Regangan rangkakan, setelah 1 tahun, ϵ_{sh} = 750×10^{-6} in./in.

ϵ_t = 1500×10^{-6} in./in.

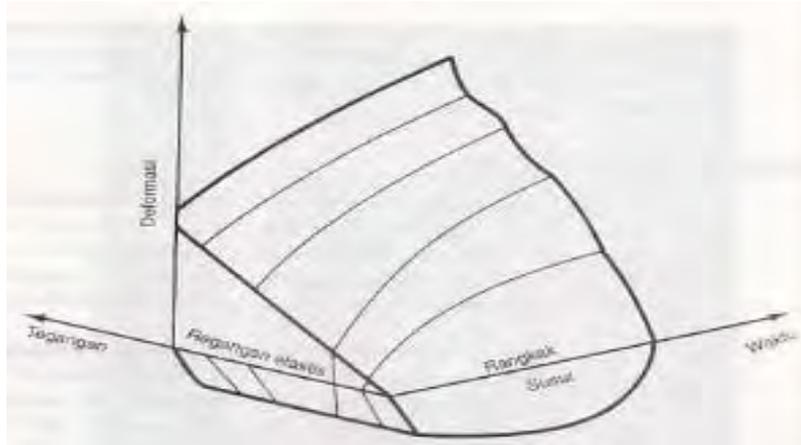
Nilai-nilai relative ini mengilustrasikan bahwa hubungan tegangan-regangan untuk pembebanan jangka pendek akan kehilangan artinya dan pembebanan jangka panjang menjadi dominan di dalam mempengaruhi perilaku struktur. Gambar 2.6 mengilustrasikan penambahan regangan rangkakan terhadap waktu, dan seperti pada kasus susut, terlihat bahwa laju rangkakan berkurang terhadap waktu.



Gambar 2.6 kurva regangan –waktu

Gambar 2.7 menunjukkan secara kualitatif, di dalam model tiga dimensi, ketiga jenis regangan yang dibahas di atas yang berasal dari tegangan tekan yang terus menerus dan susut. Karena rangkai bergantung pada waktu, maka model ini harus sedemikian hingga sumbu – sumbu orthogonalnya adalah deformasi, tegangan dan waktu.

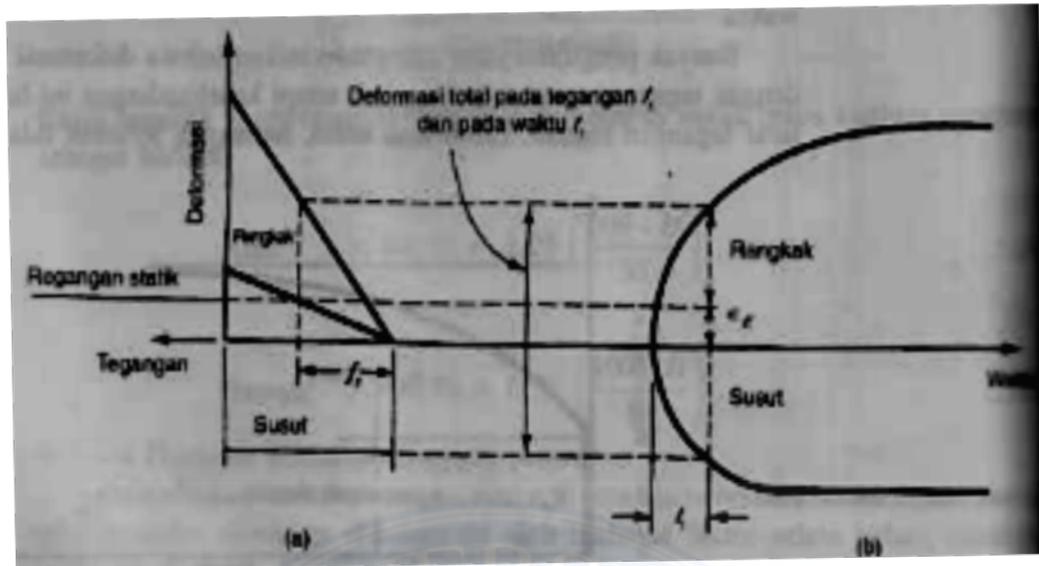
Banyak pengujian yang mengindikasikan bahwa deformasi rangkai sebanding dengan tegangan yang bekerja, akan tetapi kesebandingan ini hanya berlaku untuk taraf tegangan rendah. Limit atas untuk hubungan tersebut tidak dapat ditentukan secara akurat, namun dapat bervariasi antara 0,2 dan 0,5 dari kuat ultimit f_c' . Selang limit kesebandingan ini disebabkan karena banyaknya retak mikro pada taraf sekitar 40 persen dari beban ultimit.



Gambar 2.7 Model tiga dimensi untuk perilaku structural yang bergantung pada waktu.

sumber : Beton Prategang, E.G.Nawy,2001; jilid 1

Gambar 2.8a menunjukkan potongan dari model tiga dimensi di dalam gambar 2.8 yang sejajar dengan bidang yang mengandung sumbu tegangan dan sumbu deformasi pada saat t_1 . Potongan ini mengindikasikan bahwa baik regangan elastis maupun rangkak berbanding lurus dengan tegangan yang bekerja. Dengan cara serupa gambar 2.8b mengilustrasikan potongan yang sejajar dengan bidang yang mengandung sumbu waktu dan sumbu regangan pada taraf tegangan f_1 ; dengan demikian didapatkan hubungan yang telah dikenal antara rangkak terhadap waktu dan susut terhadap waktu.



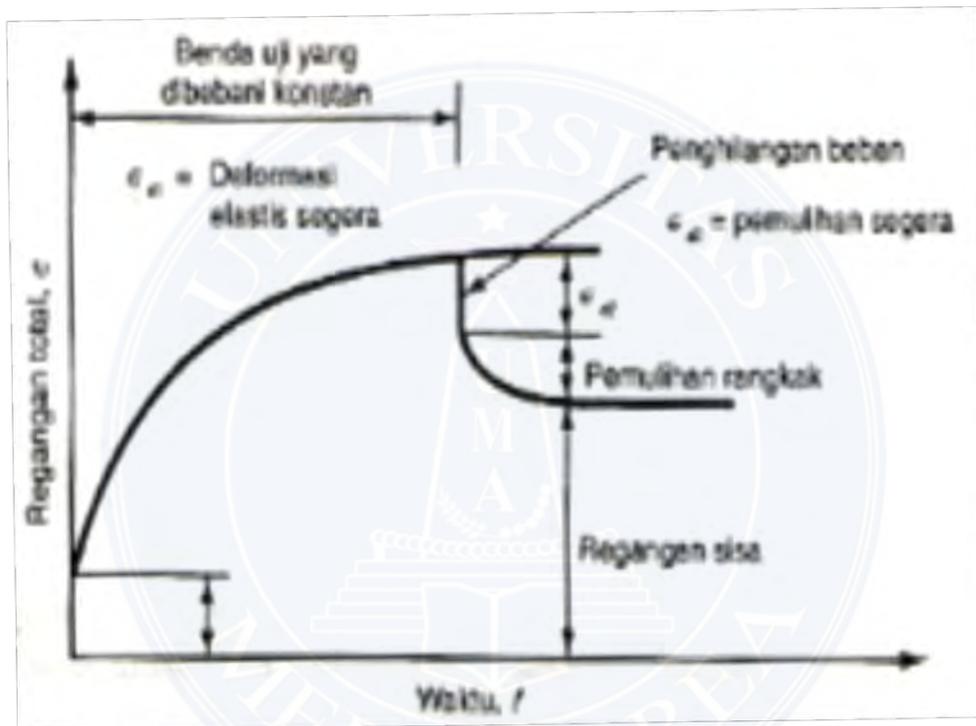
Gambar 2.8 (a) Potongan yang sejajar dengan bidang tegangan-deformasi. (b) Potongan yang sejajar dengan bidang deformasi – waktu.

sumber : Beton Prategang, E.G.Nawy,2001; jilid 1

Seperti pada kasus susut, rangkak juga tidak dapat seluruhnya pulih. Apabila suatu benda uji dihilangkan bebannya sesudah bekerja terus menerus selama suatu selang waktu, maka pemulihan elastis segera akan terjadi dan besarnya lebih kecil daripada regangan segera akibat beban. Pemulihan segera tersebut akan diikuti dengan pengurangan regangan secara gradual yang disebut pemulihan rangkak. Besarnya pemulihan bergantung pada umur beton pada saat dibebani, dengan beton yang lebih tua akan mengalami pemulihan rangkak lebih besar, sementara deformasi atau regangan sisa menjadi “beku” di dalam elemen struktural (lihat Gambar 2.9).

Rangkak sangat berkaitan dengan susut, dan sebagai aturan umum, beton yang menahan susut juga cenderung mengalami sedikit rangkak, karena kedua fenomena tersebut berkaitan dengan pasta semen yang terhidrasi. Dengan

demikian, rangkai dipengaruhi oleh komposisi beton, kondisi lingkungan dan ukuran benda uji, tetapi secara prinsip rangkai bergantung pada pembebanan sebagai fungsi dari waktu. Dengan demikian, seperti susut, peningkatan pada rasio air / semen dan kandungan semen akan meningkatkan rangkai. Juga, seperti pada susut, agregat mempengaruhi efek pengekanan sedemikian sehingga peningkatan kandungan agregat akan mengurangi rangkai.



Gambar 2.9 Pemulihan rangkai versus waktu.

sumber : Beton Prategang, E.G.Nawy,2001; jilid 1

8. Efek Rangkai

Seperti pada susut, rangkai meningkatkan defleksi balok dan slab, dan menyebabkan kehilangan prategang. Selain itu, eksentrisitas awal pada kolom beton bertulang meningkat terhadap waktu akibat rangkai, yang menyebabkan terjadinya transfer beban tekan dari beton ke baja pada penampang.

Apabila baja telah leleh, tambahan beban harus dipikul oleh beton. Akibatnya, kapasitas menahan pada kolom akan berkurang dan kelengkungan kolom akan membesar lebih jauh, yang menyebabkan terjadinya kelebihan tegangan pada beton, dan akhirnya terjadi kegagalan.

9. Susut

Pada dasarnya, ada dua jenis susut: susut plastis dan susut pengeringan. Susut plastis terjadi selama beberapa jam pertama sesudah pengecoran beton segar di cetakan. Permukaan yang diekspos seperti slab lantai akan lebih dipengaruhi oleh udara kering karena besarnya permukaan kontak. Dalam kasus seperti itu, kandungan air akan menguap lebih cepat dari permukaan beton dibandingkan dengan air yang mengalir dari lapisan – lapisan bawah elemen beton. Di pihak lain, susut pengeringan terjadi sesudah beton mengering dan sebagian besar proses hidrasi kimiawi di pasta semen telah terjadi.

Susut pengeringan adalah berkurangnya volume elemen beton apabila terjadi kehilangan kandungan air akibat penguapan. Fenomena sebaliknya, yaitu penambahan volume karena penyerapan air, disebut membengkak. Penyusutan dan pembengkakan menunjukkan perpindahan air ke luar dan ke dalam struktur benda uji beton akibat perbedaan level kelembaban atau kejenuhan antara benda uji dan sekelilingnya, dalam hal ini tidak tergantung pada beban eksternal.

Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya susut pengeringan adalah:

- a. Agregat . agregat beraksi menahan susut pasta semen; jadi, beton dengan lebih banyak kandungan agregat akan lebih sedikit mengalami susut. Selain itu, derajat pengeangan suatu beton ditentukan oleh besaran agregat. Beton dengan modulus elastisitas tinggi atau dengan permukaan kasar lebih dapat menahan proses susut.
- b. Rasio air/semen. Semakin tinggi rasio air/semen, semakin tinggi pula efek susut.
- c. Ukuran elemen beton. Baik laju maupun besar total susut berkurang apabila volume elemen beton semakin besar. Namun, durasi susut akan lebih lama untuk komponen struktur yang lebih besar karena lebih banyak waktu yang dibutuhkan dalam pengeringan untuk mencapai daerah dalam. Mungkin saja satu tahun dibutuhkan untuk proses pengeringan pada kedalaman 10 in. dari permukaan yang diekspos, dan sepuluh tahun untuk mulai pada 24 in. di bawah permukaan yang diekspos.
- d. Kondisi kelembaban di sekitar. Kelembaban relative pada lingkungan sekitar sangat mempengaruhi besarnya susut; laju penyusutan lebih kecil pada kelembaban relative yang lebih tinggi. Temperatur lingkungan juga merupakan faktor. Itu sebabnya susut menjadi stabil pada temperatur rendah.
- e. Banyaknya penulangan. Beton bertulang menyusut lebih sedikit dibandingkan dengan beton polos; perbedaan relatifnya merupakan fungsi dari persentase penulangan.
- f. Bahan tambahan. Efek ini bervariasi bergantung pada jenis bahan tambahan. Akselerator seperti kalsium klorida, yang digunakan untuk

mempercepat pengerasan beton, memperbesar susut. Pozzolan juga dapat memperbesar susut pengeringan, sedangkan bahan-bahan pemerangkap udara hanya mempunyai sedikit pengaruh.

- g. Jenis semen. Semen yang cepat mengering akan susut lebih banyak dibandingkan jenis-jenis lainnya. Sedangkan semen pengkompensasi susut akan mengurangi atau mengeliminasi retak susut apabila digunakan bersama tulangan pengekang.
- h. Karbonasi. Susut karbonasi disebabkan oleh reaksi antara karbondioksida (CO_2) yang ada di atmosfer dan yang ada di pasta semen. Banyaknya susut gabungan bergantung pada urutan pada urutan proses karbonasi dan pengeringan. Apabila kedua fenomena tersebut terjadi secara simultan, maka susut yang terjadi akan lebih sedikit. Proses karbonasi dapat sangat tereduksi pada kelembaban relative di bawah 50 persen.

2.4.1.1 Penulangan Nonprategang

Penulangan baja untuk beton terdiri atas batang, kawat dan jalinan kawat yang dilas yang semuanya dibuat sesuai dengan standard ASTM. Besaran yang paling penting pada baja tulangan adalah:

1. Modulus young, E_s
2. Kuat leleh, f_y
3. Kuat ultimit, f_u
4. Notasi mutu baja
5. Ukuran atau diameter batang atau kawat

Untuk meningkatkan lekatan antara beton dan baja, proyeksi yang disebut deformasi digilaskan pada permukaan batang. Deformasi tersebut harus memenuhi spesifikasi ASTM A616-76 agar batang tersebut dapat dinyatakan sebagai deformed. Kawat deformed (berulir) mempunyai indentasi yang ditekan ke dalam kawat atau batang agar berfungsi sebagai deformasi. Untuk baja mutu 40,60, dan 75. Kuat lelehnya masing – masing adalah 40.000, 60.000 dan 75.000 psi (276,345, dan 517 N/mm²) dan pada umumnya mempunyai titik leleh yang terdefinisi dengan baik. Untuk baja yang tidak mempunyai titik leleh yang terdefinisi dengan baik, nilai kuat leleh diambil sama dengan kekuatan yang terkait dengan regangan satuan sebesar 0,005 untuk baja mutu 40 dan 60, dan 0,0035 untuk baja mutu 80. Kuat tarik ultimit untuk baja mutu 40,60 dan 80 masing-masing adalah 70.000, 90.000, dan 100.000 psi (483, 621 dan 690 N/mm²). Beberapa jenis baja ditunjukkan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Mutu Tulangan dan Kekuatannya

| Jenis standard 1982 | Titik leleh atau kuat leleh minimum, f_y (psi) | Kuat ultimit, f_u (psi) |
|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Baja billet (A615) | | |
| Mutu 40 | 40.000 | 70.000 |
| Mutu 60 | 60.000 | 90.000 |
| Baja axle (A617) | | |
| Mutu 40 | 40.000 | 70.000 |
| Mutu 60 | 60.000 | 90.000 |
| Baja kandung rendah (A706): Mutu 60 | 60.000 | 80.000 |
| Kawat berulir | | |
| Tulangan | 75.000 | 85.000 |
| Jalinan | 70.000 | 80.000 |
| Kawat Polos | | |
| Tulangan | 70.000 | 80.000 |
| Jalinan | 65.000, 56.000 | 75.000, 70.000 |

sumber : Beton Prategang, E.G.Nawy,2001; jilid 1

Tabel 2.4 Penulangan Kawat Standar

| | | Satuan Amerika Serikat | | | Luas (in ² /ft lebar untuk berbagai jarak) | | | | | | |
|------------|------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ukuran W&D | | Diameter nominal (in.) | Luas nominal (in ²) | Berat nominal (lb/ft) | Jarak as ke as (in.) | | | | | | |
| Polos | Ulir | | | | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| W31 | D31 | 0.628 | 0.310 | 1.054 | 1.86 | 1.24 | 0.93 | 0.62 | 0.465 | 0.372 | 0.31 |
| W30 | D30 | 0.618 | 0.300 | 1.020 | 1.80 | 1.20 | 0.9 | 0.60 | 0.45 | 0.366 | 0.30 |
| W28 | D28 | 0.597 | 0.280 | 0.952 | 1.68 | 1.12 | 0.84 | 0.56 | 0.42 | 0.336 | 0.28 |
| W26 | D26 | 0.575 | 0.260 | 0.934 | 1.56 | 1.04 | 0.78 | 0.52 | 0.39 | 0.312 | 0.26 |
| W24 | D24 | 0.553 | 0.240 | 0.816 | 1.44 | 0.96 | 0.72 | 0.48 | 0.36 | 0.288 | 0.24 |
| W22 | D22 | 0.529 | 0.220 | 0.748 | 1.32 | 0.88 | 0.66 | 0.44 | 0.33 | 0.264 | 0.22 |
| W20 | D20 | 0.504 | 0.200 | 0.680 | 1.20 | 0.80 | 0.60 | 0.40 | 0.30 | 0.24 | 0.20 |
| W18 | D18 | 0.478 | 0.180 | 0.612 | 1.08 | 0.72 | 0.54 | 0.36 | 0.27 | 0.216 | 0.18 |
| W16 | D16 | 0.451 | 0.160 | 0.544 | 0.96 | 0.64 | 0.48 | 0.32 | 0.24 | 0.192 | 0.16 |
| W14 | D14 | 0.422 | 0.140 | 0.476 | 0.84 | 0.56 | 0.42 | 0.28 | 0.21 | 0.168 | 0.14 |
| W12 | D12 | 0.390 | 0.120 | 0.408 | 0.72 | 0.48 | 0.36 | 0.24 | 0.18 | 0.144 | 0.12 |
| W11 | D11 | 0.374 | 0.110 | 0.374 | 0.66 | 0.44 | 0.33 | 0.22 | 0.165 | 0.132 | 0.11 |
| W10.5 | | 0.366 | 0.105 | 0.357 | 0.63 | 0.42 | 0.315 | 0.21 | 0.157 | 0.126 | 0.105 |
| W10 | D10 | 0.356 | 0.100 | 0.340 | 0.60 | 0.40 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.12 | 0.10 |
| W9.5 | | 0.348 | 0.095 | 0.323 | 0.57 | 0.38 | 0.285 | 0.19 | 0.142 | 0.114 | 0.095 |
| W9 | D9 | 0.338 | 0.090 | 0.306 | 0.54 | 0.36 | 0.27 | 0.18 | 0.135 | 0.108 | 0.09 |
| W8.5 | | 0.329 | 0.085 | 0.289 | 0.51 | 0.34 | 0.255 | 0.17 | 0.127 | 0.102 | 0.085 |
| W8 | D8 | 0.319 | 0.080 | 0.272 | 0.48 | 0.32 | 0.24 | 0.16 | 0.12 | 0.096 | 0.08 |
| W7.5 | | 0.309 | 0.075 | 0.255 | 0.45 | 0.30 | 0.225 | 0.15 | 0.112 | 0.09 | 0.08 |
| W7 | D7 | 0.298 | 0.070 | 0.238 | 0.42 | 0.28 | 0.21 | 0.14 | 0.105 | 0.084 | 0.07 |
| W6.5 | | 0.288 | 0.065 | 0.221 | 0.39 | 0.26 | 0.195 | 0.13 | 0.097 | 0.078 | 0.07 |
| W6 | D6 | 0.276 | 0.060 | 0.204 | 0.36 | 0.24 | 0.18 | 0.12 | 0.09 | 0.072 | 0.06 |
| W5.5 | | 0.264 | 0.055 | 0.187 | 0.33 | 0.22 | 0.165 | 0.11 | 0.082 | 0.066 | 0.06 |
| W5 | D5 | 0.252 | 0.050 | 0.170 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.10 | 0.075 | 0.06 | 0.05 |
| W4.5 | | 0.240 | 0.045 | 0.153 | 0.27 | 0.18 | 0.135 | 0.09 | 0.067 | 0.054 | 0.05 |
| W4 | D4 | 0.225 | 0.040 | 0.136 | 0.24 | 0.16 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.048 | 0.04 |
| W3.5 | | 0.211 | 0.035 | 0.119 | 0.21 | 0.14 | 0.105 | 0.07 | 0.052 | 0.042 | 0.04 |
| W3 | | 0.195 | 0.030 | 0.102 | 0.18 | 0.12 | 0.09 | 0.06 | 0.045 | 0.036 | 0.03 |
| W2.9 | | 0.192 | 0.029 | 0.098 | 0.17 | 0.116 | 0.087 | 0.058 | 0.043 | 0.035 | 0.03 |
| W2.5 | | 0.178 | 0.025 | 0.085 | 0.15 | 0.10 | 0.075 | 0.05 | 0.037 | 0.03 | 0.03 |
| W2 | | 0.159 | 0.020 | 0.068 | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.024 | 0.02 |
| W1.4 | | 0.135 | 0.014 | 0.049 | 0.084 | 0.056 | 0.042 | 0.028 | 0.021 | 0.017 | 0.01 |

sumber: buku Beton prategang, Edward g. Nawy, 2001

Dari tabel 2.4 di atas besaran geometri untuk beberapa penulangan kawat standard. Tabel 2.5 menunjukkan besaran geometris berbagai ukuran tulangan.

Tabel 2.5 Berat, luas, dan keliling batang individual

| Nomor Batang | Berat per foot (lb) | Dimensi nominal standar | | | |
|--------------|---------------------|-------------------------|------|---------------------------|----------|
| | | Diameter, | | Luas penampang, | Keliling |
| | | d_b (in.) | (mm) | A_b (in. ²) | (in.) |
| 3 | 0.376 | 0.375 | 9 | 0.11 | 1.178 |
| 4 | 0.668 | 0.500 | 13 | 0.20 | 1.571 |
| 5 | 1.043 | 0.625 | 16 | 0.31 | 1.963 |
| 6 | 1.502 | 0.750 | 19 | 0.44 | 2.356 |
| 7 | 2.044 | 0.875 | 22 | 0.60 | 2.749 |
| 8 | 2.670 | 1.000 | 25 | 0.79 | 3.142 |
| 9 | 3.400 | 1.128 | 28 | 1.00 | 3.544 |
| 10 | 4.303 | 1.270 | 31 | 1.27 | 3.990 |
| 11 | 5.313 | 1.410 | 33 | 1.56 | 4.430 |
| 14 | 7.65 | 1.693 | 43 | 2.25 | 5.32 |
| 18 | 13.60 | 2.257 | 56 | 4.00 | 7.09 |

sumber: buku Beton prategang, Edward g. Nawy, 2001

2.4.2 Baja Prategang

Sesuai karangan Edward G. Nawy dalam bukunya Beton Prategang, jilid 1, edisi ketiga tahun 2001, menjelaskan mengenai baja prategang pada sub bab berikut ini:

1. Jenis-jenis baja prategang

Karena tingginya kehilangan rangkai dan susut pada beton, maka prategang efektif dapat dicapai dengan menggunakan baja dengan mutu sangat tinggi hingga 270.000 psi atau lebih (11228 Mpa atau lebih tinggi lagi). Baja bermutu tinggi seperti itu dapat mengimbangi kehilangan di beton sekitarnya dan mempunyai taraf tegangan sisa yang dapat menahan gaya prategang yang dibutuhkan. Besarnya kehilangan prategang normal dapat diperkirakan di dalam selang 35.000 sampai 60.000 psi (241 sampai 414 Mpa). Karena itu, prategang awal harus sangat tinggi, sekitar 180.000 sampai 220.000 psi (1241 sampai 1517 MPa). Dari besarnya kehilangan prategang yang disebutkan di atas, dapat

disimpulkan bahwa baja normal dengan kuat leleh $f_y = 60.000$ psi (414 MPa) hanya akan mempunyai sedikit tegangan prategang sesudah semua kehilangan prategang terjadi yang memperjelas kebutuhan penggunaan baja mutu tinggi untuk komponen struktur beton prategang.

Baja prategang dapat berbentuk kawat-kawat tunggal, strand yang terdiri atas beberapa kawat yang dipuntir membentuk elemen tunggal dan batang-batang bermutu tinggi. Tiga jenis yang umum digunakan di Amerika Serikat adalah:

- a. Kawat-kawat relaksasi rendah atau stress-relieved tak berlapisan.
- b. Strands relaksasi rendah atau stress-relieved strands tak berlapisan.
- c. Batang-batang baja mutu tinggi tak berlapisan.

Kawat-kawat atau strands yang tidak stress-relieved, seperti kawat-kawat diluruskan atau kawat-kawat berpelumas yang sering digunakan di Negara – negara lain, akan mengalami kehilangan relaksasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kawat-kawat atau strands berjenis stress-relieved. Dengan demikian, besarnya kehilangan sesuai perlu diperhitungkan secara benar setelah jenis baja prategang yang dibutuhkan ditetapkan.

2. Strands dan Kawat-kawat Berelaksasi Rendah Dan Stress-Relieved

Kawat –kawat stress-relieved adalah kawat-kawat tunggal yang ditarik dingin yang sesuai dengan standard ASTM A-421; stress-relieved strands mengikuti standard ASTM A 416. Strands terbuat dari tujuh kawat dengan memuntir enam di antaranya pada pitch sebesar 12 sampai 16 kali diameter di sekeliling kawat lurus yang sedikit lebih besar. Pelepasan tegangan dilakukan sesudah kawat-kawat dijalin menjadi strand. Besaran geometris kawat dan strand

sebagaimana disyaratkan dalam ASTM masing masing tercantum di dalam tabel 2.6 dan tabel 2.7

Untuk memaksimalkan luas baja strand 7 kawat untuk suatu diameter nominal, kawat standard dapat dibentuk menjadi strand yang dipadatkan seperti terlihat dalam gambar 2.10 (b); ini berbeda dengan strand tujuh kawat standar yang terlihat dalam gambar 2.10 (a). Standar ASTM A 779 mensyaratkan besaran geometris dan kuat minimum sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.8

Gambar 2.11 (a) menunjukkan diagram tegangan-regangan tipikal untuk baja kawat dan strand prategang, sedangkan gambar 2.11 (b) menunjukkan nilai-nilai relatif untuk baja lunak.

Tabel 2.6 Kawat-kawat untuk Beton Prategang

| Diameter nominal (in) | Kuat tarik minimum (psi) | | Tegangan minimum pada ekstensi 1% (psi) | |
|---------------------------|------------------------------|---------|--|---------|
| | Tipe BA | Tipe WA | Tipe BA | Tipe WA |
| 0,192 | | 250.000 | | 212.500 |
| 0,196 | 240.000 | 250.000 | 204.000 | 212.500 |
| 0,250 | 240.000 | 240.000 | 204.000 | 204.000 |
| 0,276 | 235.000 | 235.000 | 199.750 | 199.750 |

Sumber: Post-Tensioning Institute (beton prategang , Edward g. Nawy, 2001)

Tabel 2.7 Strand Standar Tujuh Kawat untuk Beton Prategang

| Diameter nominal strand (in.) | Kuat patah strand (min. lb) | Luas baja nominal strand (in. 2) | Berat nominal strand (lb/1000 ft)* | Beban minimum pada ekstensi 1% (lb) |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| MUTU 250 | | | | |
| ¼(0,250) | 9.000 | 0,036 | 122 | 7.650 |
| 5/16 (0,313) | 14.500 | 0,058 | 197 | 12.300 |
| 3/8 (0,375) | 20.000 | 0,080 | 272 | 17.000 |
| 7/16 (0,438) | 27.000 | 0,108 | 367 | 23.000 |
| 1/2 (0,500) | 36.000 | 0,144 | 490 | 30.600 |
| 3/5(0,600) | 54.000 | 0,216 | 737 | 45.900 |
| MUTU 270 | | | | |
| 3/8 (0,375) | 23.000 | 0,085 | 290 | 19.550 |
| 7/16 (0,438) | 31.000 | 0,115 | 390 | 26.350 |
| 1/2 (0,500) | 41.300 | 0,153 | 520 | 35.100 |
| 3/5(0,600) | 58.600 | 0,217 | 740 | 49.800 |

*100.000 psi = 689,5 MPa

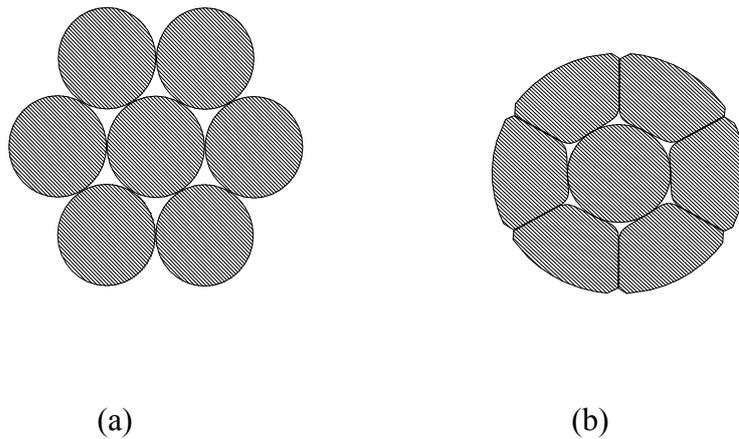
0,1 in = 2,54 mm, 1 in² = 645 mm²

Berat : kalikan dengan 1,49 untuk mendapatkan berat dalam kg per 1000 m.

1000 lb = 4448 N

Sumber: Post-Tensioning Institute

(sumber : Beton Prategang, Edward g. Nawy, 2001)



Gambar 2.10 Strands prategang 7 kawat standar dan dipadatkan. (a) Penampang strand standar. (b) Penampang strand yang dipadatkan

Tabel 2.8 Strand 7 Kawat yang dipadatkan untuk beton prategang (ASTM A779).

| Diameter nominal (in.) | Kuat nominal (min.lb.)* | patah strand | Luas baja nominal strand (in. ²) | Berat nominal strand (/1000 ft-lb) |
|------------------------|-------------------------|--------------|--|------------------------------------|
| 1/2 | 47.000 | | 0,174 | 600 |
| 0,6 | 67.440 | | 0,256 | 873 |
| 0,7 | 85.430 | | 0,346 | 1176 |

*1000 lb = 4448 N

Mutu 270: kuat ultimit $f_{pu} = 270.000$ psi (1862 MPa)

1 in. = 25,4 mm, 1 in.² = 645 mm²

sumber: buku Beton prategang, Edward g. Nawy, 2001

3. Baja Prategang Berkekuatan Tarik Tinggi

Dalam pemilihan batang baja paduan berkekuatan tarik tinggi yang digunakan untuk pemberian prategang dapat berulir atau polos, dan tersedia dalam ukuran diameter nominal dari $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) sampai 1,375 in. (35 mm). Batang-

batang tersebut harus memenuhi standard ASTM A 722. Selain ditarik dalam kondisi dingin dengan maksud meningkatkan kuat leleh, batang prategang juga dilepaskan tegangannya (stress relieved) untuk meningkatkan daktilitasnya. Pelepasan tegangan ini dilakukan dengan memanaskan batang tersebut hingga temperature yang layak, biasanya di bawah 500 ° C. Meskipun proses pelepasan tegangan untuk batang dan strand pada dasarnya sama, kuat tarik batang prategang harus sedikitnya 150.000 psi (1034 Mpa), dengan kuat leleh minimum sebesar 85 persen dari kuat ultimit untuk batang polos dan 80 persen untuk batang ulir.

Tabel 2.9 berisi property geometri dari batang prategang seperti disyaratkan standard ASTM A 722, dan gambar 2.11 menunjukkan diagram tegangan –regangan tipikal untuk batang seperti itu.

Tabel 2.9 Batang Baja Untuk Beton Prategang

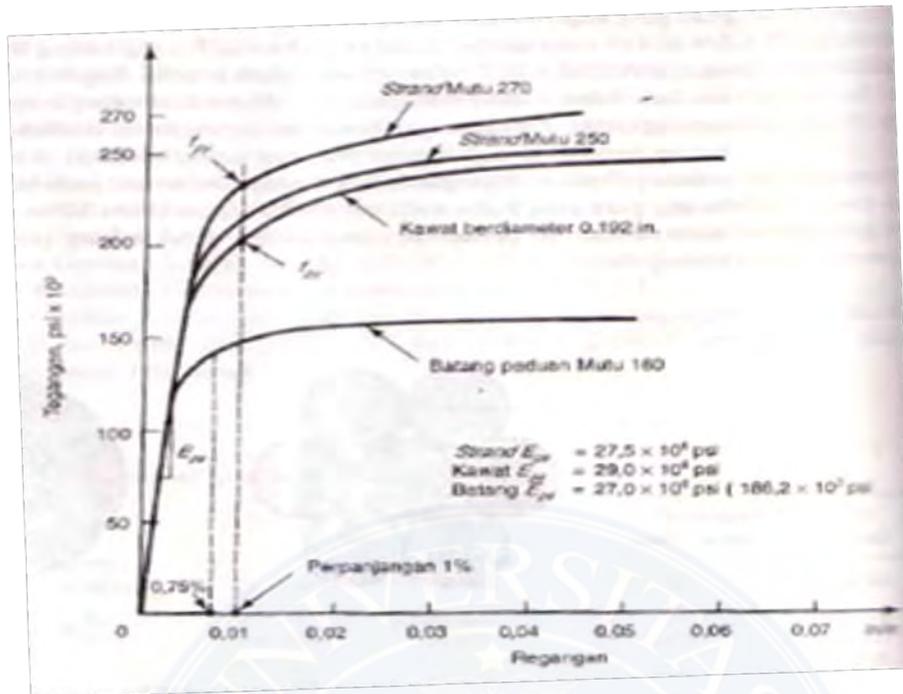
| Jenis batang | Diameter nominal (in.) | Luas baja nominal (in. ²) |
|--|---------------------------|--|
| Baja paduan | 0,750 | 0,442 |
| Polos mutu 145 atau 160 (ASTM A722) | 0,875 | 0,601 |
| | 1,000 | 0,785 |
| | 1,125 | 0,994 |
| | 1,250 | 1,227 |
| | 1,375 | 1,485 |
| Batang-batang Berulir | 0,625 | 0,280 |
| | 1,000 | 0,852 |
| | 1,250 | 1,295 |

d. Mutu 145: $f_{pu} = 145.000$ psi (1000 MPa)

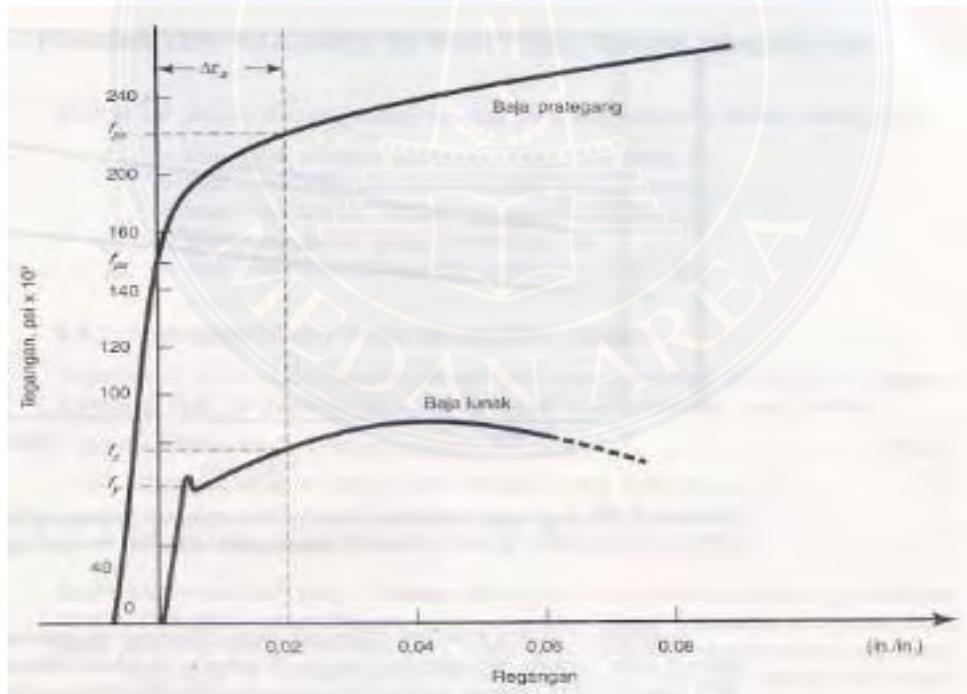
Mutu 160: $f_{pu} = 160.000$ psi (1103 MPa)

1 in. = 25,4 mm, 1 in.² = 645 mm²

Sumber : Beton Prategang, Edward g. Nawy, 2001



Gambar 2.11a Diagram tegangan-regangan untuk baja prategang



Gambar 2.11b Diagram tegangan-regangan untuk strand baja prategang yang mengalami tekan dan mempunyai penulangan batang baja lunak.

sumber: Beton prategang, Edward G. Nawy, jilid 1

4 Relaksasi Baja

Relaksasi baja dalam baja prategang adalah kehilangan prategang apabila kawat-kawat atau strand mengalami regangan yang pada dasarnya konstan. Ini identik dengan rangkai pada beton, dengan perbedaan bahwa rangkai adalah perubahan regangan, sedangkan relaksasi baja adalah kehilangan tegangan pada baja. Kehilangan tegangan akibat relaksasi pada kawat dan strands yang tegangannya dilepaskan dapat dihitung dengan menggunakan rumus

$$\Delta f_R = f_{pi} \frac{\log t}{10} \left\{ \frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right\} \dots\dots\dots(2.10)$$

Di mana t adalah waktu dalam jam, dengan ketentuan $f_p/f_{py} \geq 0,55$ dan $f_{py} \cong 0,85 f_{pu}$ untuk stress-relieved strand dan $0,90$ untuk strand berelaksasi rendah. Juga, $f_{pi} = 0,82 f_{py}$ segera setelah transfer tetapi $f_{pi} \leq 0,74 f_{pu}$ untuk pratarik, dan $0,70 f_{pu}$ untuk pascatarik. Pada umumnya, $f_{pi} \cong 0,70 f_{pu}$.

Kehilangan akibat relaksasi tegangan dapat dikurangi dengan memberikan pada strands yang semula bertegangan hingga 70 persen dari kuat ultimit f_{pu} temperatur 20^0C sampai 100^0C selama waktu lama sehingga dihasilkan perpanjangan permanen ini adalah suatu proses yang disebut stabilisasi. Baja prategang yang dihasilkan dengan cara ini disebut baja relaksasi rendah dan mempunyai kehilangan tegangan relaksasi hanya 25 persen dari yang terjadi pada baja stress-relieved biasa.

Rumus untuk relaksasi tegangan pada baja prategang berelaksasi rendah adalah

$$\Delta f_R = f_{pi} \frac{\log t}{45} \left\{ \frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right\} \dots\dots\dots(2.11)$$

2.6 Fungsi Tendon Pada Beton Pratekan

Fungsi utama tendon adalah menyalurkan gaya prategang pada saat transfer gaya ke beton, akibat berat sendiri /beban mati, dan membuat ukuran penampang lebih efektif dan efisien.

2.7 Tegangan-Tegangan Izin Maksimum Di Beton dan Tendon

2.7.1 Tegangan-Tegangan Izin Maksimum Di Beton Dan Tendon Menurut ACI.

Berikut ini adalah definisi notasi penting yang digunakan di dalam subbab ini:

f_{py} = kuat leleh tendon prategang yang ditetapkan, psi

f_y = kuat leleh tulangan nonprategang yang ditetapkan, psi

f_{pu} = kuat tarik tendon prategang yang ditetapkan, psi

f_c' = kuat tekan beton yang ditetapkan, psi

f_{ci}' = kuat tekan beton pada saat prategang awal, psi

A. Tegangan Beton Yang Mengalami Lentur

Tegangan di beton segera setelah transfer prategang (sebelum terjadinya kehilangan prategang yang bergantung pada waktu) tidak boleh melebihi yang berikut:

(a) Tegangan tekan di serat terluar..... $0,60 f_{ci}'$

(b) Tegangan tarik di serat terluar, kecuali yang ditetapkan di (c)..... $3 \sqrt{f_c'}$

(c) Tegangan tarik di serat terluar di ujung balok yang

ditumpu sederhana $6 \sqrt{f_c'}$.

Apabila tegangan tarik yang dihitung melebihi nilai yang tercantum, maka penulangan lekatan tambahan (nonprategang atau prategang) harus digunakan di daerah tarik untuk menahan gaya tarik total yang dihitung dengan asumsi penampang tak retak.

Tegangan di beton pada kondisi beban kerja (sesudah semua kehilangan prategang) tidak boleh melebihi yang berikut:

- (a) Tegangan tekan di serat terluar akibat prategang ditambah beban tetap..... $0,45 f_{ci}'$
- (b) Tegangan tekan di serat terluar akibat prategang ditambah beban total..... $0,60 f_{ci}'$
- (c) Tegangan tarik di serat terluar pada daerah tarik yang semula tekan $6 \sqrt{f_{c'}}$
- (d) Tegangan tarik di serat terluar pada daerah tarik yang semula juga tarik pada komponen struktur (kecuali system slab dua arah), di mana analisis yang didasarkan atas penampang retak tertransformasi dan atas hubungan momen defleksi bilinear menunjukkan bahwa defleksi segera dan jangka panjang memenuhi persyaratan ACI dan persyaratan selimut beton minimum..... $12 \sqrt{f_{c'}}$

B. Tegangan Baja Prategang

Tegangan tarik di tendon prategang tidak boleh melebihi yang berikut:

- (a) Akibat gaya dongkrak pada tendon..... $0,94 f_{py}$
tetapi tidak boleh lebih besar daripada yang terkecil di antara $0,80 f_{pu}$ dan nilai maksimum yang disarankan oleh pembuat jangkar atau tendon prategang.

- (b) Segera setelah transfer prategang..... $0,82 f_{py}$
tapi tidak lebih besar dari $0,74 f_{pu}$
- (c) Tendon pascatarik, pada saat pengangkatan dan perangkaian, segera
setelah pengangkatan tendon..... $0,70 f_{pu}$

2.7.2. Tegangan Izin Maksimum AASHTO Di Beton Dan Tendon

A. Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Rangkak dan Susut

A.1. Daerah Tekan;

- Komponen struktur pratarik..... $0,60 f_{ci}'$
Komponen struktur pascatarik..... $0,55$

f_{ci}'

A.2 Daerah Tarik;

Daerah tarik yang semula tertekan.....tidak ada
tegangan sementara izin yang ditetapkan daerah lainnya

Di daerah tarik tanpa ada penulangan lekatan..... 200 psi atau $3 \sqrt{f_{ci}'}$

Apabila tegangan tarik yang dihitung melebihi nilai ini, maka tulangan
lekatan harus digunakan untuk menahan gaya tarik total di beton yang dihitung
dengan menggunakan asumsi penampang tak retak. Tegangan tarik maksimum
tidak boleh melebihi..... $7,5 \sqrt{f_{ci}'}$

B. Tegangan Beton Pada Kondisi Beban Kerja Sesudah Terjadi Kehilangan

Tekan..... $0,40 f_c'$

Tarik pada daerah tarik yang semula tertekan

- (a) Untuk komponen struktur dengan penulangan lekatan..... $6 \sqrt{f_{ci}'}$

- Untuk kondisi ekpos korosif, seperti daerah pantai..... $3\sqrt{f_{ci}'}$
- (b) Untuk komponen struktur tanpa penulangan lekatan.....0

B.1. Tegangan Retak

- Untuk beton normal..... $7,5\sqrt{f_{ci}'}$
- Untuk beton ringan –pasir $6,3\sqrt{f_{ci}'}$
- Untuk beton ringan lainnya..... $5,5\sqrt{f_{ci}'}$

B.2. Tegangan Tumpu Penjangkaran

- Penjangkaran pascatarik pada kondisi beban kerja.....3000 psi
(tetapi tidak boleh melebihi $0,9 f_{ci}'$)

C. Tegangan Baja Prategang

- (a) Akibat pendongkrakan tendon..... $0,94 f_{py} \leq 0,80 f_{pu}$
- (b) Segera sesudah transfer prategang..... $0,82 f_{py} \leq 0,74 f_{pu}$
- (c) Tendon pascatarik pada penjangkaran, segera sesudah penjangkaran tendon..... $0,70 f_{pu}$
 $f_{py} \approx 0,85 f_{py}$ (untuk relaksasi rendah, $f_{py} = 0,90 f_{pu}$)

Dengan demikian, untuk tendon 270 K yang digunakan di topik ini, f_{pi} pada saat transfer = $0,70 \times 270.000 = 189.000$ psi (1300 MPa)

2.8 Kehilangan Sebagian Prategang

Suatu kenyataan yang jelas bahwa gaya prategang awal yang diberikan ke elemen beton mengalami proses reduksi yang progresif selama waktu kurang lebih lima tahun. Tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahap

pembebanan, dari tahap transfer gaya prategang ke beton, sampai ke berbagai tahap prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja, hingga mencapai ultimit.

Reduksi gaya prategang dapat dikelompokkan dalam dua kategori:

1. Kehilangan elastis segera

Kehilangan terjadi pada saat proses fabrikasi atau konstruksi, termasuk perpendekan beton secara elastis, kehilangan karena pengangkeran dan kehilangan karena gesekan.

2. Kehilangan yang bergantung pada waktu

Ini seperti rangkai, susut, kehilangan akibat efek temperature, dan relaksasi baja.

Kehilangan lump sum seperti dirangkum di dalam Tabel 2.10

Tabel 2.10 Kehilangan lump- sum dari AASHTO

| Jenis baja prategang | Kehilangan total | |
|---|--|--|
| | $f_c' = 4000$ psi (27,6 N/mm ²) | $f_c' = 5000$ psi (34,5 N/mm ²) |
| Strand pratarik | | 45.000 psi (310 /mm ²) |
| Kawat atau strand pascatarik ^a | 32.000 psi (221 /mm ²) | 33.000 psi (228 /mm ²) |
| batang | 22.000 psi (152 /mm ²) | 23.000 psi (159 /mm ²) |

^a Kehilangan karena gesekan tidak termasuk.

Tabel 2.11 Perkiraan Kehilangan Prategang Untuk Pascatarik

| Bahan tendon pascatarik | Kehilangan prategang, psi | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| | slab | Balok dan joists |
| Strand 270K stress-relieved dan kawat 240K stress-relieved | 30.000 psi (207 /mm ²) | 35.000 psi (241 /mm ²) |

| | | |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Batang | 20.000 psi (138 /mm ²) | 25.000 psi (172 /mm ²) |
| Strand 270K relaksasi rendah | 15.000 psi (103 /mm ²) | 20.000 psi (138 /mm ²) |

Nilai di tabel ini tidak mencakup kehilangan akibat friksi

sumber: Edward G. Nawy, jilid 1

Rangkuman sumber-sumber untuk mendapatkan nilai kehilangan prategang dan tahapan terjadinya dicantumkan dalam Tabel 2.12, di mana subskrip *i* menunjukkan “awal” dan subskrip *j* menunjukkan taraf pembebanan sesudah pendongkrakan. Dari tabel ini, kehilangan total prategang dapat dihitung untuk komponen struktur pratarik dan pascatarik sebagai berikut:

(i) Komponen Struktur Pratarik

$$\Delta f_{\rho T} = \Delta f_{\rho ES} + \Delta f_{\rho R} + \Delta f_{\rho CR} + \Delta f_{\rho SH}$$

.....(2.12a)

$$\text{Di mana } \Delta f_{\rho R} = \Delta f_{\rho R}(t_0, t_{tr}) + \Delta f_{\rho R}(t_{tr}, t_s)$$

t_0 = waktu pada saat pendongkrakan

t_{tr} = waktu pada saat transfer

t_s = waktu pada saat kehilangan telah stabil

jadi, perhitungan untuk relaksasi baja harus dilakukan untuk selang waktu t_1 dan t_2 dari masing-masing tahap pembebanan.

Sebagai contoh, tahap transfer, misalnya pada 18 jam, akan menghasilkan $t_{tr} = t_2 = 18$ jam dan $t_0 = t_1 = 0$. Jika tahap pembebanan berikutnya di antara transfer dan 5 tahun (17.250 jam), pada saat kehilangan dipandang telah stabil, maka $t_2 = t_1 = 17.520$ jam dan $t_1 = 18$ jam. Kemudian, jika f_{pi} adalah tegangan prategang awal yang dialami elemen beton dan f_{pj} adalah tegangan pendongkrakan di tendon, maka

$$f_{pi} = f_{pJ} - \Delta f_{pR} (t_0, t_{tr}) - \Delta f_{pES} \dots\dots\dots$$

(2.12b)

Tabel 2.12 Jenis-jenis Kehilangan Prategang

| Jenis kehilangan prategang | Tahap terjadinya | | Kehilangan tegangan tendon | |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| | Komponen struktur pratarik | Komponen struktur pascatarik | Selama selang waktu (t_i, t_j) | Total atau selama hidup |
| Perpendekan elastic beton (ES) | Saat transfer | Saat pendongkrakan sekuensial | | Δf_{pES} |
| Relaksasi tendon (R) | Sebelum dan sesudah transfer | Sesudah transfer | $\Delta f_{pR} (t_i, t_j)$ | Δf_{pR} |
| Rangkak beton (CR) | sesudah transfer | Sesudah transfer | $\Delta f_{pC} (t_i, t_j)$ | Δf_{pCR} |
| Susut beton (SH) | sesudah transfer | Sesudah transfer | $\Delta f_{pS} (t_i, t_j)$ | Δf_{pSH} |
| Friksi (F) | | Saat pendongkrakan | | Δf_{pF} |
| Kehilangan karena pengangkeran (A) | | Saat transfer | | Δf_{pA} |
| Total | Hidup | Hidup | $\Delta f_{pT} (t_i, t_j)$ | Δf_{pT} |

Sumber : Beton prategang, Edward G. Nawy, jilid 1

(ii) Komponen Struktur Pascatarik

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} \dots\dots\dots$$

(2.12c)

di mana Δf_{pES} hanya berlaku apabila tendon didongkrak secara sekuensial, dan bukan secara simultan.

Dalam hal pascatarik, perhitungan kehilangan akibat relaksasi dimulai antara waktu transfer $t_1 = t_{tr}$ dan akhir selang waktu t_2 yang sedang ditinjau. Jadi

$$f_{pi} = f_{pJ} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \dots\dots\dots$$

(2.12d)

2.8.1 Kehilangan Elastis Segera

A. Perpendekan elastis beton (*ES*)

Beton memendek pada saat gaya prategang bekerja padanya. Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya.

A.1 Elemen –elemen Pratarik

Untuk elemen-elemen (pracetak) pratarik, gaya tekan yang dikerjakan pada balok oleh tendon menyebabkan perpendekan longitudinal pada balok. Perpendekan satuan pada beton adalah $\epsilon_{ES} = \Delta_{ES}/L$, sehingga

$$\epsilon_{ES} = \frac{f_c}{E_c} = \frac{P_i}{A_c E_c} \dots\dots\dots(2.13a)$$

Karena tendon prategang mengalami besarnya perpendekan yang sama, maka

$$\Delta f_{pES} = E_s \varepsilon_{ES} = \frac{E_s P_i}{A_c E_c} = \frac{n P_i}{A_c} = n f_{cs}$$

(2.13b)

Di mana rasio modulus awal $n = \frac{E_s}{E_{ci}}$.

Tegangan di beton pada pusat berat baja akibat prategang awal adalah

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c} \tag{2.14}$$

Jika tendon mempunyai eksentrisitas e pada tengah bentang balok dan momen akibat berat sendiri M_D diperhitungkan, maka tegangan yang dialami beton di penampang tengah bentang pada level baja prategang menjadi

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D e}{I_c} \tag{2.15}$$

Di mana P_i mempunyai nilai lebih kecil setelah transfer prategang. Reduksi yang kecil dari P_j menjadi P_i ini terjadi karena gaya di baja prategang segera setelah transfer lebih kecil dari pada gaya pendongkrakan awal P_j . Sekalipun demikian, karena nilai tereduksi P_i tersebut sulit ditentukan secara akurat, dan karena penelitian – penelitian menunjukkan bahwa reduksi ini sangat kecil persentasenya, maka nilai awal sebelum transfer P_i ini dapat digunakan di dalam persamaan 2.13 sampai 2.15 atau kurang sekitar 10 persen jika dikehendaki.

A.2 Elemen –elemen Pascatarik

Di balok pascatarik, kehilangan akibat perpendekan elastis bervariasi dari nol jika semua tendon didongkrak secara simultan, hingga setengah dari nilai yang dihitung pada kasus pratarik dengan beberapa pendongkrak sekuensial digunakan, seperti pendongkrakan dua tendon sekaligus. Jika n adalah banyaknya tendon atau pasangan tendon yang ditarik secara sekuensial, maka

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \tag{2.16}$$

Yang mana j menunjukkan nomor operasi pendongkrakan. Perhatikan bahwa tendon yang ditarik terakhir tidak mengalami kehilangan akibat perpendekan elastic, sedangkan tendon yang ditarik pertama mengalami banyak kehilangan yang maksimum.

Pada kedua kasus, kehilangan prategang di balok pascatarik adalah setengah dari balok pratarik.

B. Kehilangan karena pengangkeran

Kehilangan karena dudukan angker pada komponen struktur pascatarik diakibatkan adanya blok-blok pada angker saat gaya pendongkrak ditransfer ke angker. Kehilangan ini juga terjadi pada landasan cetakan prategang pada komponen struktur pratarik akibat dilakukannya penyesuaian pada saat gaya prategang ditransfer ke landasan. Cara mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan. Pada umumnya besarnya kehilangan karena dudukan angker bervariasi antara $\frac{1}{4}$ in dan $\frac{3}{8}$ in. (6,35 mm dan 9,53 mm) untuk angker dengan dua blok. Besar pemberian kelebihan tegangan yang dibutuhkan bergantung pada system pengangkeran yang digunakan karena setiap sistem mempunyai mempunyai kebutuhan penyesuaian sendiri-sendiri, dan pembuatnya diharapkan mensuplai data mengenai gelincir yang dapat terjadi akibat penyesuaian angker. Jika Δ_A adalah besar gelincir, L adalah panjang tendon, dan E_{ps} adalah modulus kawat prategang, maka kehilangan prategang akibat gelincir angker menjadi

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} \dots \dots \dots (2.17)$$

C. Kehilangan Yang Diakibatkan Friksi (F)

Kehilangan prategang terjadi pada komponen struktur pascatarik akibat adanya gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari alinyemen tendon, yang disebut efek kelengkungan, dan deviasi local di dalam alinyemen tendon, yang disebut efek “*wobble*.” Besarnya koefisien kehilangan sering dihitung dengan teliti dalam menyiapkan gambar kerja dengan mempersiapkan tipe tendon dan ketepatan alinyemen saluran. Efek kelengkungan dapat ditetapkan terlebih dahulu, sedangkan efek wobble merupakan hasil dari penyimpangan alinyemen yang tak sengaja atau yang tak dapat dihindari, karena saluran tidak dapat secara sempurna diletakkan.

Perlu diperhatikan bahwa kehilangan tegangan friksional maksimum terjadi di ujung balok jika pendongkrakan dilakukan dari satu ujung. Dengan demikian, kehilangan akibat adanya gesekan bervariasi secara linier di sepanjang bentang balok dan dapat diinterpolasi untuk lokasi tertentu jika dikehendaki perhitungan yang lebih teliti.

C.1 Efek Kelengkungan

Pada saat tendon ditarik dengan gaya F_1 di ujung pendongkrakan, tendon tersebut mengalami gesekan dengan saluran di sekitarnya sedemikian hingga tegangan di tendon akan bervariasi dari bidang pendongkrakan ke jarak L di sepanjang bentang. Jika panjang tendon yang sangat kecil dibuat sebagai diagram benda bebas, maka dengan mengasumsikan bahwa μ adalah koefisien gesekan antara tendon dan salurannya akibat efek kelengkungan, maka

$$dF_1 = -\mu F_1 d\alpha$$

atau

$$\frac{dF_1}{F_1} = -\mu d\alpha \dots\dots\dots (2.18a)$$

Dengan mengintegrasikan kedua sisi persamaan di atas

$$\log_e F_1 = -\mu \alpha \dots\dots\dots (2.18b)$$

Jika $\alpha = L/R$, maka

$$F_2 = F_1 e^{-\mu\alpha} = F_1 e^{-\mu(\frac{L}{R})} \dots\dots\dots (2.19)$$

C.2 Efek Panjang (*Wobble*)

Misalkan bahwa K adalah koefisien gesek antara tendon dan beton di sekitarnya akibat efek wobble atau efek panjang. Kehilangan gesekan yang diakibatkan oleh ketidaksempurnaan dalam alinyemen di seluruh panjang tendon, tak peduli apakah alinyemennya lurus atau draped. Kemudian, dengan menggunakan prinsip-prinsip yang sama dengan yang telah digunakan dalam menurunkan persamaan 2.18,

$$\log_e F_1 = -KL \dots\dots\dots (2.20)$$

atau

$$F_2 = F_1 e^{-KL} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan menggabungkan efek wobble dengan efek kelengkungan, maka,

$$F_2 = F_1 e^{-\mu\alpha - KL}$$

atau, jika dinyatakan dalam tegangan,

$$f_2 = f_1 e^{-\mu\alpha - KL} \dots\dots\dots (2.22)$$

Jadi, kehilangan tegangan Δf_{pF} akibat gesekan dapat dinyatakan dengan

$$\Delta f_{pF} = f_1 - f_2 = (1 - e^{-\mu\alpha - KL}) \dots\dots\dots (2.23)$$

Dengan mengasumsikan bahwa gaya prategang antara bagian awal dari porsi yang melengkung dan ujungnya kecil (kira-kira 15 persen), maka adalah cukup akurat untuk menggunakan tarik awal untuk seluruh kelengkungan dalam persamaan 2.23. Jadi persamaan 2.23 dapat disederhanakan menjadi,

$$\Delta f_{pF} = -f_1 (\mu\alpha + KL) \dots \dots \dots (2.24)$$

di mana L dinyatakan dalam feet.

Karena rasio tinggi balok terhadap bentangnya kecil, maka panjang proyeksi tendon dapat digunakan untuk menghitung α . Dengan mengasumsikan bahwa kelengkungan tendon sesuai dengan busur lingkaran, maka sudut α di sepanjang segmen yang melengkung di dalam gambar 2.18 besarnya dua kali kemiringan di ujung segmen. Jadi,

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{x/2} = \frac{2m}{x}$$

Jika $y \cong \frac{1}{2} m$ dan $\alpha/2 = 4y/x$

maka $\alpha = 8y/x$ radian $\dots \dots \dots (2.25)$

Tabel 2.13 memberikan nilai-nilai desain untuk koefisien gesek kelengkungan μ dan koefisien gesek panjang atau wobble K yang dikutip dari ACI 318 Commentary.

Tabel 2.13 Koefisien Gesek Kelengkungan dan Wobble

| Jenis Tendon | Koefisien wobble K per foot | Koefisien kelengkungan, μ |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Tendon di selebng metal fleksibel | | |
| Tendon kawat | 0,0010-0,0015 | 0,15-0,25 |
| Strand 7 kawat | 0,0005-0,0020 | 0,15-0,25 |
| Batang mutu tinggi | 0,0001-0,0006 | 0,08-0,30 |
| Tendon di saluran metal yang rigid | | |
| Strand 7 kawat | 0,0002 | 0,15-0,25 |
| Tendon yang dilapisi mastic | | |

| | | |
|--|---------------|-----------|
| Tendon kawat dan Strand 7 kawat Tendon yang dilumasi dahulu | 0,0010-0,0020 | 0,05-0,15 |
| Tendon kawat dan Strand 7 kawat | 0,0003-0,0020 | 0,05-0,15 |

Sumber: Prestressed Concrete Institute

2.8.2 Kehilangan yang bergantung pada waktu (jangka panjang)

a Kehilangan yang diakibatkan oleh rangkak (CR)

Penelitian eksperimental yang dilakukan selama setengah abad yang lalu mengindikasikan bahwa aliran di material terjadi di sepanjang waktu apabila ada beban atau tegangan. Deformasi atau aliran lateral akibat tegangan longitudinal disebut rangkak (creep). Perlu ditekankan bahwa tegangan rangkak dan kehilangan tegangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elemen structural.

Deformasi atau tegangan yang berasal dari perilaku yang bergantung pada waktu ini merupakan fungsi dari besarnya beban yang bekerja, lamanya, serta sifat beton yang meliputi proporsi campurannya, kondisi perawatannya, umur elemen pada saat dibebani pertama kali, dan kondisi lingkungan. Karena hubungan tegangan-regangan akibat rangkak pada dasarnya linier, maka regangan rangkak ϵ_{CR} dan regangan elastic ϵ_{EL} dapat dihubungkan linier sedemikian hingga koefisien rangkak C_u dapat didefinisikan sebagai,

$$C_u = \frac{\epsilon_{CR}}{\epsilon_{EL}} \dots\dots\dots(2.26a)$$

Dengan demikian, koefisien rangkak pada waktu sembarang t dalam hari dapat didefinisikan sebagai

$$C_t = \frac{t^{0,60}}{10+t^{0,60}} C_u \dots\dots\dots(2.26b)$$

Nilai C_u bervariasi di antara 2 dan 4, dengan rata-rata 2,35 untuk rangkai ultimit. Kehilangan prategang di komponen struktur prategang akibat rangkai dapat didefinisikan untuk struktur bonded

$$\Delta f_{pCR} = C_t \frac{E_{ps}}{E_c} f_{cs} \dots\dots\dots(2.27)$$

Di mana f_{cs} adalah tegangan di beton pada level pusat berat tendon prategang. Pada umumnya, kehilangan ini merupakan fungsi dari tegangan di beton pada penampang yang sedang ditinjau. Pada komponen struktur pascatarik nonbonded, pada dasarnya kehilangannya dapat dipandang seragam di sepanjang bentangnya. Dengan demikian, nilai rata-rata untuk tegangan beton \bar{f}_{cs} di antara titik-titik angker dapat digunakan untuk menghitung rangkai di komponen struktur pascatarik.

Rumus komite ACI-ASCE untuk menghitung kehilangan akibat rangkai pada dasarnya sama dengan persamaan 2.27

$$\Delta f_{pCR} = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} (\bar{f}_{cs} - \bar{f}_{csd}) \dots\dots\dots(2.28a)$$

Atau $\Delta f_{pCR} = nK_{CR} (\bar{f}_{cs} - \bar{f}_{csd}) \dots\dots\dots(2.28b)$

Di mana $K_{CR} = 2,0$ untuk komponen struktur pratarik

= 1,60 untuk komponen struktur pascatarik (keduanya untuk beton normal)

\bar{f}_{cs} = tegangan di beton pada level pusat berat baja segera setelah transfer

\bar{f}_{csd} = tegangan di beton pada level pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan

$$n = \text{rasio modulus} \left(n = \frac{E_s}{E_c} \right)$$

Dapat diperhatikan bahwa K_{CR} harus dikurangi 20 persen untuk beton ringan

b Kehilangan Yang Diakibatkan Oleh Susut (SH)

Besarnya susut beton dipengaruhi oleh beberapa factor. Factor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan. Ukuran dan bentuk komponen struktur juga mempengaruhi susut. Kira-kira 80 persen dari susut terjadi pada tahun pertama. Nilai rata-rata regangan susut ultimit pada beton yang dirawat basah maupun yang dirawat uap dilaporkan sebesar 780×10^{-6} in./in. di dalam ACI 209 R-92 Report. Nilai rata-rata ini dipengaruhi oleh panjang perawatan basah awal, kelembaban relative sekitar, rasio volum-permukaan, temperature dan komposisi beton. Untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh tersebut, nilai rata-rata regangan susut harus dikalikan dengan factor koreksi γ_{SH} sebagai berikut

$$\epsilon_{SH} = 780 \times 10^{-6} \gamma_{SH} \dots \dots \dots (2.29)$$

Komponen-komponen dari γ_{SH} adalah faktor-faktor untuk berbagai kondisi lingkungan dan ditabulasikan di dalam subbab 2.

Untuk kondisi standard, prestressed concrete institute menetapkan nilai rata-rata untuk regangan susut ultimit nominal $(\epsilon_{SH})_u = 820 \times 10^{-6}$ in./in. (mm/mm). Jika ϵ_{SH} adalah regangan susut sesudah menyesuaikan untuk kelembaban relative pada rasio volum-permukaan V/S, kehilangan prategang pada komponen struktur pratarik adalah

$$\Delta f_{pSH} = \epsilon_{SH} \times E_{ps} \dots\dots\dots$$

(2.30)

Untuk komponen struktur pascatarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pascatarik. Jika kelembaban relative diambil sebagai nilai persen dan efek rasio V/S ditinjau, rumus umum Prestressed Concrete Institute untuk menghitung kehilangan prategang akibat susut menjadi

$$\Delta f_{pSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{PS} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \dots\dots (2.31)$$

Di mana $K_{SH} = 1,0$ untuk komponen struktur pratarik. Tabel 2.14 memberikan nilai

K_{SH} untuk komponen struktur pascatarik.

Penyesuaian kehilangan susut untuk kondisi standard sebagai fungsi dari waktu t dalam hari sesudah 7 hari untuk perawatan basah dan 3 hari untuk perawatan uap dapat diperoleh dari rumus-rumus berikut:

(a) Perawatan basah, sesudah 7 hari

$$(\epsilon_{SH})_t = \frac{t}{35+t} (\epsilon_{SH})_u \dots\dots\dots(2.32)$$

a)

di mana $(\epsilon_{SH})_u$ adalah regangan susut ultimit, t = waktu dalam hari sesudah susut ditinjau.

(b) Perawatan uap, sesudah 1 sampai 3 hari

$$(\epsilon_{SH})_t = \frac{t}{55+t} (\epsilon_{SH})_u \dots\dots\dots(2.32)$$

b)

Tabel 2.14 Nilai K_{SH} Untuk Komponen Struktur Pascatarik

| | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Waktu dari akhir perawatan basah hingga pemberian Prategang, hari | 1 | 3 | 5 | 7 | 10 | 20 | 30 | 60 |
| K_{SH} | 0,92 | 0,85 | 0,80 | 0,77 | 0,73 | 0,64 | 0,58 | 0,45 |

Sumber: Prestressed Concrete Institute

Sumber : Beton prategang, Edward G.Nawy jilid 1

c. Kehilangan Relaksasi Tegangan Baja (R)

Tendon stress-relieved mengalami kehilangan pada gaya prategang sebagai akibat dari perpanjangan konstan terhadap waktu. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang ditahan, melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang f_{pi}/f_{py} . Kehilangan tegangan seperti ini disebut relaksasi tegangan. Peraturan ACI 318-99 membatasi tegangan tarik di tendon prategang sebagai berikut:

(a) Untuk tegangan akibat gaya pendongkrakan tendon, $f_{pJ} = 0,94 f_{py}$, tetapi tidak lebih besar dari pada yang terkecil di antara $0,80 f_{pu}$ dan nilai maksimum yang disarankan oleh pembuat tendon dan angker.

(b) Segera setelah transfer prategang, $f_{pJ} = 0,94 f_{py}$, tetapi tidak lebih besar dari pada $0,74 f_{pu}$.

(c) Pada tendon pascatarik, di pengangkatan dan perangkat segera setelah transfer gaya = $0,70 f_{pu}$.

Nilai f_{py} dapat dihitung dari

$$\text{Batang prategang: } f_{py} = 0,80 f_{pu}$$

$$\text{Tendon stress-relieved, } f_{py} = 0,85 f_{pu}$$

$$\text{Tendon relaksasi rendah, } f_{py} = 0,90 f_{pu}$$

Jika f_{pR} adalah tegangan prategang yang tersisa pada baja sesudah relaksasi, maka rumus berikut dapat digunakan untuk mendapatkan f_{pR} untuk baja *stress-relieved*:

$$\frac{f_{pR}}{f_{pi}} = \left(1 - \frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \dots\dots\dots (2.33)$$

Di dalam rumus tersebut, t dinyatakan dalam jam dan $\log t$ mempunyai basis 10, f_{pi} / f_{py} melebihi 0,55, dan $t = t_2 - t_1$. Juga, untuk baja relaksasi rendah, penyebut di dalam suku log dalam persamaan tersebut dibagi dengan 45, bukan 10.

Pendekatan untuk suku $(\log t_2 - \log t_1)$ dalam persamaan 2.33 dapat dilakukan sedemikian hingga $\log t = \log (t_2 - t_1)$ tanpa kehilangan ketelitian yang berarti. Dalam hal ini, kehilangan karena relaksasi tegangan menjadi

$$\Delta f_{pR} = f_{pi}' \left(\frac{\log t}{10} \frac{f_{pi}'}{f_{py}} \right) - 0,55 \dots\dots\dots (2.34)$$

Di mana f_{pi}' adalah tegangan awal di baja yang dialami elemen beton.

Jika analisis kehilangan dengan cara langkah demi langkah dibutuhkan, maka inkremen kehilangan pada suatu tahap dapat didefinisikan sebagai

$$\Delta f_{pR} = f_{pi}' \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{10} \right) \left(\frac{f_{pi}'}{f_{py}} - 0,55 \right) \dots\dots\dots (2.35)$$

Di mana t_1 adalah waktu pada awal suatu interval dan t_2 adalah waktu di akhir interval, yang keduanya dihitung dari saat pendongkrakan.

Menghitung kehilangan yang diakibatkan relaksasi dengan metode ACI – ASCE menggunakan persamaan

$$\Delta f_{pR} = [K_{re} - J (f_{pES} + f_{pCR} + f_{pSH})] \times C$$

Nilai K_{re} , J dan C diberikan di dalam Tabel 2.15 dan 2.16

Tabel 2.15 Nilai C

| f_{pi} / f_{pu} | Kawat atau strand stress-relieved | Kawat atau strand relaksasi rendah atau batang stress-relieved |
|-------------------|-----------------------------------|--|
| 0,80 | | 1,28 |
| 0,79 | | 1,22 |
| 0,78 | | 1,16 |
| 0,77 | | 1,11 |
| 0,76 | | 1,05 |
| 0,75 | 1,45 | 1,00 |
| 0,74 | 1,36 | 0,95 |
| 0,73 | 1,27 | 0,90 |
| 0,72 | 1,18 | 0,85 |
| 0,71 | 1,09 | 0,80 |
| 0,70 | 1,00 | 0,75 |
| 0,69 | 0,94 | 0,70 |
| 0,68 | 0,89 | 0,66 |
| 0,67 | 0,83 | 0,61 |
| 0,66 | 0,78 | 0,57 |
| 0,65 | 0,73 | 0,53 |
| 0,64 | 0,68 | 0,49 |
| 0,63 | 0,63 | 0,45 |
| 0,62 | 0,58 | 0,41 |
| 0,61 | 0,53 | 0,37 |
| 0,60 | 0,49 | 0,33 |

Tabel 2.16 Nilai K_{RE} dan J

| Jenis tendon ^a | K_{RE} | J |
|---|----------|-------|
| Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 270 | 20.000 | 0,15 |
| Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 250 | 18.500 | 0,14 |
| Kawat <i>stress-relieved</i> mutu 240 atau 235 | 17.600 | 0,13 |
| Strand relaksasi rendah mutu 270 | 5000 | 0,040 |
| Kawat relaksasi rendah mutu 250 | 4630 | 0,037 |
| Kawat relaksasi rendah mutu 240 atau 235 | 4400 | 0,035 |
| Batang <i>stress-relieved</i> mutu 145 atau 160 | 6000 | 0,05 |

^asesuai dengan ASTM A416-74, ASTM A421-76 atau ASTM A722-75

Sumber: Prestressed Concrete Institute, dari beton prategang, Edward G.Nawy jilid 1

2.9 Teori Pembebanan Menurut RSNI T-02-2005

Faktor beban (K) untuk berat sendiri beton cor di tempat biasa dikalikan dengan 1,3 dan faktor beban untuk beban mati tambahan dipilih dengan mengalikan 2,0. Sedangkan factor beban untuk beban hidup dengan mengalikan 1,8.

2.10 Metode Perletakan Box Girder

Berdasarkan gambar kerja perletakan PC. box girder fly over dengan bentang terpanjang 55 meter yang bertumpu pada dua tumpuan, tumpuan awal terletak di pondasi P5, tumpuan kedua di P6, dan bentang 35 m dua tempat yaitu di pondasi P5-P4 dan P6-P7, box girder bentang 55 m dan 35 m dibuat menerus, dimana sistem perletakan tumpuan adalah sendi dan rol, sendi pada box girder

hanya di pilar & pondasi P5, dengan bergerak pada arah memanjang ke P4 dan P6 atau P7, sedangkan di P4, P6, dan P7 adalah rol. Semua sendi dan rol arah melintang terkunci.

2.11 Prosedur Pelaksanaan Prestressed Concrete Post-tension

Langkah awal pelaksanaan prestressed concrete post-tension di lapangan ada beberapa tahap yang terinci yaitu:

1. Pemasangan tulangan memanjang dan melintang pada PC. Box girder
2. Menentukan ordinat tendon sesuai gambar kerja. Ordinat nilai dimensi (Y1) dalam meter diukur selalu dari permukaan luar plat bawah beton ke titik pusat tendon /kabel strand, titik ordinat diberi tanda (marking).
3. Memasang tulangan pendukung dengan mengikatnya ke tulangan memanjang atau tulangan geser pada posisi yang telah di marking.
4. Menyambung duct selubung tendon sesuai panjang tendon.
5. Memasukkan duct ke dalam tulangan girder, kemudian duct dipasang dan diikat dengan kawat beton.
6. Memasang casting pada angkur hidup, dimana casting sudah terpasang sebelumnya pada daerah ujung girder yang terbuat dari multiplek.
7. Memasang bursting steel pada angkur hidup dan mati. Bursting steel ini merupakan tambahan tulangan berfungsi menahan retak longitudinal didaerah angker.
8. Menyambung duct ke casting dengan masking tape. Masking tape berfungsi mencegah masuknya air semen ke dalam duct.
9. Memasukkan kabel strand ke dalam duct, kemudian dikunci disalah satu ujung angkur dan ujung satu lagi belum diberi tegangan sebelum dicor.

10. Pengecoran PC. Box girder dimulai dengan monolit sampai ke tumpuan di atas pondasi atau pier nomor P4 dan P7, sepanjang 125 meter.
11. Penegangan pada kabel diberikan setelah beton cor mengeras umur 28 hari
12. Penyuntikan air semen pada tendon, yang disebut grouting

2.12 Bahan Dan Peralatan Yang Dipergunakan Untuk Stressing

A. Bahan stressing

1. Strand

Beberapa steel wire yang disatukan secara spiral menjadi satuan kabel strand diameter 12.7 mm

2. Duct

Pembungkus strand dengan bahan dasar galvanized zinc yang dibentuk seperti pipa berulir bersifat mulur

3. Angkur –angkur /angker

Angkur ini dipasang pada ujung –ujung girder Terdiri dari dua macam yaitu angkur hidup dan angkur mati.

4. Non shrink additive untuk grouting

Campuran beton untuk mengisi celah duct dengan campuran semen, air, additive

B. Peralatan stressing

Untuk persiapan pekerjaan stressing kabel strand diperlukan peralatan utama, yaitu Hydraulic Jack dan Hydraulic pump

2.13. Jenis Komponen PC.Box Girder Berlubang

Jenis profil PC. Box Girder berlubang yang digunakan di proyek Fly over Jamin Ginting ini adalah badan PC. Box Girder terdiri dari empat buah, badan atau web 1 dan 4 untuk bagian pinggir kiri-kanan box dibuat miring dengan perbandingan 1 : 3,5, lebar plat bawah lebih kecil dari plat atas, juga bagian dinding dalam PC. box girder ini dilengkapi dengan beton yang menonjol disebut blister, berfungsi sebagai tempat anker persambungan tendon, tinggi PC. Box girder dibentuk bervariasi mulai dari tumpuan sampai ke tengah bentang, plat bawah PC.Box girder dibuat melengkung.

2.14 Pengaruh Lubang Pada PC. Box girder Berlubang

Ada dua jenis lubang pada PC. Box girder yang dibuat di Fly over Jamin Ginting ini yaitu lubang besar dan lubang kecil. Lubang besar di arah memanjang, lubang ini hanya dibatasi dengan dinding dan plat, sedangkan lubang kecil dibuat pada diaphragma dan plat bawah.

Pengaruh lubang besar pada girder adalah untuk mengurangi berat sendiri PC. Box girder, sedangkan pengaruh lubang kecil pada diaphragma dan plat bawah hanya untuk jalan masuk dan keluar pekerja pada saat membongkar bekisting dalam girder, dan mengrouting anker tendon pada blister dalam.