

Sistem Prategang

3.1 PENDAHULUAN

Berbagai metode dengan mana pratekanan (pre-compression) diberikan pada beton dapat diklasifikasikan¹ sebagai berikut:

1. Pembangkitan gaya tekan antara elemen struktural dan tumpuan-tumpuannya dengan pemakaian dongkrak datar (flat jack)
2. Pengembangan "tekanan keliling" (hoop compression) dalam struktur berbentuk silinder dengan menggulung kawat secara melingkar.
3. Pemakaian baja yang ditarik secara longitudinal yang ditanam dalam beton atau ditempatkan dalam selongsong
4. Pemakaian prinsip distorsi suatu struktur statis tak-tentu baik dengan perpindahan maupun dengan rotasi satu bagian relatif terhadap bagian lainnya
5. Pemakaian potongan baja struktural yang dilendutkan yang ditanam dalam beton sampai beton tersebut mengeras
6. Pengembangan tarikan terbatas pada baja dan tekanan pada beton dengan memakai semen yang mengembang.

Metode yang paling luas dipakai untuk memberikan prategang pada elemen beton struktural adalah dengan menarik baja ke arah longitudinal dengan alat penarik yang berbeda-beda. Prategang dengan penggunaan gaya-gaya langsung di antara tumpuan-tumpuan umumnya dipakai untuk pelengkung dan perkerasan, dan dongkrak datar selalu dipakai untuk memberikan gaya-gaya yang diinginkan. Untuk struktur bundar, seperti tangki dan pipa, biasanya pemberian prategang pada beton dilaksanakan dengan prategang melingkar. Dengan dikembangkannya semen yang mengembang, prategang pada beton dapat ditimbulkan dengan proses kimia.

3.2 ALAT PENARIK

Bermacam-macam jenis alat yang dipakai untuk menarik baja dikelompokkan dalam empat kategori utama, yaitu:

1. mekanis, 2. hidrolis, 3. listrik (termal, dan 4. kimia.

Alat-alat mekanis yang umumnya dipakai adalah timbangan dengan atau tanpa transmisi pengungkit, transmisi roda-gigi beserta dengan blok-blok kerekan, dongkrak sekrup dengan atau tanpa penggerak roda-gigi dan mesin penggulung kawat. Alat-alat ini terutama dimanfaatkan untuk memprategangkan komponen-komponen beton struktural dalam jumlah besar di pabrik.

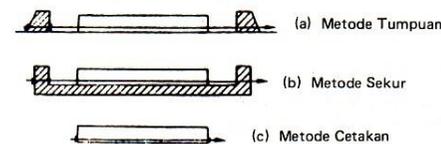
Dongkrak hidrolis, yang merupakan alat paling sederhana untuk menghasilkan gaya prategang besar, digunakan secara luas sebagai alat penarik. Beberapa dongkrak yang telah dipatenkan yang umum digunakan adalah dari Freyssinet, Magnel, Gifford Udal dan Baur-Leonhardt untuk rentang 5-100 ton. Dongkrak hidrolis yang besar untuk gaya dalam batas 200-600 ton juga telah dikembangkan oleh Baur-Leonhardt. Yang penting adalah bahwa selama operasi penarikan, gaya yang diterapkan harus diukur secara cermat dan pada hampir semua dongkrak tersebut terdapat alat pengukur tekanan yang telah dikalibrasi yang langsung menunjukkan besarnya gaya yang ditimbulkan selama penarikan kawatnya.

Alat-alat listrik telah dipakai dengan hasil yang baik di Rusia sejak 1958 untuk menarik kawat baja dan batang baja berulir. Kawat baja tersebut dipanaskan dengan aliran listrik dan diangkurkan sebelum pengecoran beton di dalam cetakan (mould). Metode ini seringkali disebut sebagai "prategang termolistrik".

Di dalam metode kimia, dipakai semen yang mengembang dan tingkat pengembangannya dikontrol dengan mengubah-ubah kondisi "perawatan" (curing). Aksi pengembangan semen pada waktu pengikatan-awal (setting) menimbulkan tarikan pada tendon dan tegangan tekan pada beton, karena pengembangannya dikekang.

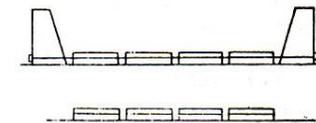
3.3 SISTEM PRATARIK

Di dalam sistem pratarik, tendon lebih dahulu ditarik antara blok-blok angkur yang tegar (rigid) yang dicetak di atas tanah atau di dalam suatu kolom atau perangkat cetakan pratarik seperti terlihat dalam Gambar 3.1, dan beton selanjutnya di cor dan dipadatkan sesuai dengan bentuk serta ukuran yang diinginkan. Oleh karena semua metode pratarik bersandar pada rekatan yang timbul antara baja dan beton sekelilingnya, adalah penting bahwa setiap tendon harus merekat sepenuhnya sepanjang seluruh panjang badan. Setelah beton mengeras, tendon dilepaskan dari alas prapenarikan dan prategang ditransfer ke beton.



Gambar 3.1 Prinsip Pratarik.

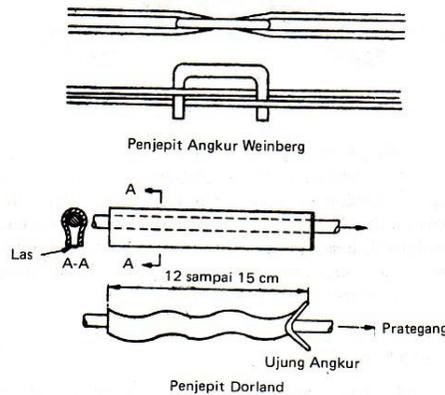
Untuk produksi massal elemen prategang, pada umumnya dipakai proses rangkaian panjang yang dikembangkan oleh Hoyer. Dalam metode ini, kawat-kawatnya direntangkan antara dua turap yang berjarak beberapa ratus meter sedemikian rupa sehingga suatu jumlah unit yang sama dapat dicetak di sepanjang kelompok kawat tegangan yang sama seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.2. Tarikan



Gambar 3.2 Sistem Pratarik Hoyer.

diberikan dengan dongkrak hidrolik atau dengan mesin penegang yang dapat dipindahkan. Kawat atau strand yang ditarik secara tunggal ataupun berkelompok, pada umumnya diikat pada tumpuannya dengan pasak baja.

Transfer prategang ke beton biasanya dilaksanakan dengan dongkrak hidrolik atau dongkrakan sekrup yang besar, dengan mana semua kawat dilepaskan secara bersamaan setelah beton mencapai kekuatan tekan yang disyaratkan. Pada umumnya strand dengan diameter sampai 18 mm dan kawat bermutu tinggi dengan diameter sampai 7 mm mengikatkan diri secara memuaskan dengan daya rekat permukaan serta daya pengikatan di dalam bahan-bahan kawat itu sendiri. Daya rekat kawat prategang dapat lebih ditingkatkan dengan membentuk ciri-ciri khusus pada permukaan dan kerutan spiral pada kawat. Strand mempunyai daya rekat yang jauh lebih baik daripada kawat tunggal dengan luas penampang yang sama. Alat-alat pengangkur tambahan diperlukan kalau kawat tunggal dengan diameter yang lebih besar (melebihi 7 mm) dipakai dalam unit pratarik yang bersangkutan. Alat-alat yang paling umum dipakai adalah "penjepit Weinberg" yang dikembangkan di Perancis² dan "penjepit Dorland" yang dikembangkan di Amerika Serikat seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Penjepit-penjepit ini diklem pada kawat yang ditarik di dekat diafragma ujung dari unit yang bersangkutan sebelum pekerjaan pembetonan.



Gambar 3.3 Alat Pengangkur Tambahan.

3.4 SISTEM PASCATARIK

3.4.1 Prinsip-prinsip Pascatarik

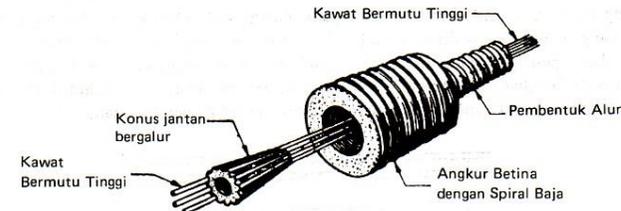
Dalam sistem pascatarik, unit beton lebih dulu dicetak dengan memasukkan saluran atau alur untuk menempatkan tendon. Apabila beton sudah cukup kuat, maka kawat bermutu tinggi ditarik dengan menggunakan bantalan dongkrak pada permukaan ujung batang dan kawat diangkurkan dengan pasak atau mur. Gaya-gaya diteruskan ke beton oleh "angkur ujung" dan juga apabila kabel melengkung, melalui tekanan radial antara kabel dan saluran. Ruang antara tendon dan saluran pada umumnya di-grout setelah penarikan.

Sistem-sistem prategang yang telah dipatenkan yang paling banyak dalam perdagangan didasarkan atas prinsip-prinsip pengangkur tendon berikut ini:

1. Aksi pasak yang menghasilkan suatu pegangan gesekan pada kawat
2. Dukungan langsung dari paku keling atau kepala baut yang dibentuk pada ujung kawat
3. Melingkarkan kawat pada sekeliling beton.

3.4.2 Pengangkur pada Sistem Pascatarik

Sistem pascatarik Freyssinet yang dikembangkan dalam tahun 1939 telah mendorong dikembangkannya berbagai sistem baru yang ditemukan bertahun-tahun kemudian dan pada saat sekarang ini terdapat lebih dari 64 sistem pascatarik yang telah dipatenkan menurut Albeles⁴. Beberapa yang lebih penting, yang dipakai secara luas di berbagai negara, telah disusun dalam Tabel 3.1, dan Gambar 3.4 – 3.10, yang didasarkan atas pengamatan Abeles⁴ dan Bennett⁵.



Gambar 3.4 Sistem Freyssinet.

Sistem pascatarik yang berdasarkan aksi pasak meliputi sistem-sistem pengangkur Freyssinet, Gifford-Udall, Anderson, dan Magnel-Blaton. Dalam hal sistem Lee-McCall, B.B.R.V., Dywidag, dan Prescon, gaya-gaya diteruskan oleh bantalan pada blok-blok ujung. Sistem Baur-Leonhardt dan Leoba termasuk dalam kelompok pengangkur melingkar. Tipe tendon yang dipakai, besarnya gaya, tipe saluran kabel, dan susunan tendon dalam saluran metode penarikan, serta tipe pengangkur yang dipakai dikelompokkan dalam Tabel 3.1 untuk beberapa sistem pascatarik yang penting.

3.4.3 Penerapan Pascatarik

Secara ideal pascatarik cocok untuk pekerjaan yang dilaksanakan di tempat dengan bentangan menengah (medium) sampai panjang di mana biaya penarikan hanya merupakan sebagian kecil dari seluruh pekerjaan dan dalam hal ini lebih ekonomis untuk memakai sedikit kabel atau batang dengan gaya yang besar pada masing-masingnya daripada memakai banyak kabel dengan gaya yang kecil. Pascatarik dapat dipakai secara menguntungkan untuk membuat batang-batang besar, seperti lantai jembatan berbentuk panjang dengan tipe gelagar kotak dengan memberikan prategang secara bersama-sama sejumlah unit pracetak yang lebih kecil. Selain keuntungan ini, manfaat utama dari pascatarik adalah bahwa ia memungkinkan pemakaian kabel-kabel melengkung atau yang berubah-ubah arahnya yang membantu perancang untuk mengubah distribusi prategang potongan demi potongan sehingga dapat mengimbangi beban-beban luar secara lebih efisien.

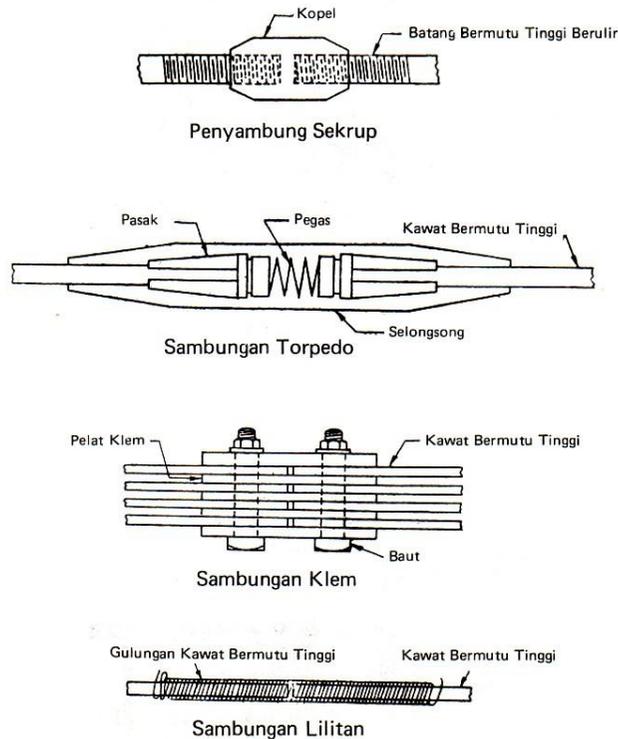
Pascatarik selalu dipakai untuk memperkuat bendungan beton, prategang melingkar dari tangki-tangki beton yang besar, serta perisai-perisai biologis dari reaktor nuklir. Pascatarik secara ideal cocok dalam pekerjaan konstruksi beton yang bersangkutan dengan prategang bertahap⁶. Hampir semua struktur jembatan berbentuk panjang dibangun dengan memakai sistem pascatarik.

3.4.4 Sambungan Tendon (Tendon Splices)

Pada kasus batang beton prategang menerus yang menyangkut tendon panjang, perlu dibuat sambungan tendon untuk mendapatkan kontinuitas. Beberapa tipe sambungan telah dikembangkan selama bertahun-tahun untuk menyesuaikan bermacam-macam tipe kawat dan strand yang dipakai sebagai tendon. Beberapa tipe susunan sambungan yang penting dipakai secara luas⁷ dikelompokkan dalam Gambar 3.11.

Penyambung sekrup biasa digunakan untuk menyambung batang-batang bermutu tinggi yang mempunyai diameter besar yang dapat diberi uliran pada ujung-ujungnya. Selongsong dari lembaran logam dengan diameter yang dibesarkan dan panjang yang cukup umumnya dipakai untuk menutupi sambungan tersebut. Sambungan dengan uliran sekrup tidak dianjurkan untuk menyambung baja prategang dengan cara pemanasan yang mudah sekali terkena korosi tegangan.

Sambungan torpedo terdiri dari pasak rangkap tiga untuk mengunci kawat-kawat dan keseluruhan unit dilindungi dengan suatu selongsong. Tipe sambungan ini banyak dipakai



Gambar 3.11 Sambungan-sambungan Tendon.

untuk menyambung kawat-kawat yang dibuat dengan proses tarik dingin yang digunakan untuk memberikan prategang melingkar pada tangki. Keuntungan sambungan ini adalah bahwa tidak terdapat reduksi pada kekuatan kawat.

Sambungan klem dilengkapi dengan baut dan mur dengan serangkaian pelat klem untuk menempatkan tendon di antaranya. Oleh karena akan terdapat suatu reduksi yang cukup besar dalam kekuatan tarik sampai dengan 50 persen, tipe sambungan ini hanya dapat dipakai dalam lokasi di mana gaya prategang telah dikurangi secukupnya oleh kelengkungan tendon yang disebabkan oleh gesekan. Untuk menyambung kawat-kawat dengan diameter kecil sebesar 3-6 mm, maka kawat yang bermutu tinggi dililitkan pada tegangan tarik tinggi dengan memakai mesin penggulung kawat yang dikembangkan oleh para penemu sistem B.B.R.V. Kawat lilitan dengan diameter 1 mm umumnya digunakan untuk menyambung kawat dengan diameter sampai dengan 6 mm. Panjang sambungan dapat bervariasi dari 20-30 cm. Sambungan yang dibentuk dengan cara ini mempunyai kekuatan hampir sama dengan kekuatan kawat normal. Tipe sambungan ini umumnya dipakai untuk kawat pada tangki beton bundar dan ikatan pada ankur.

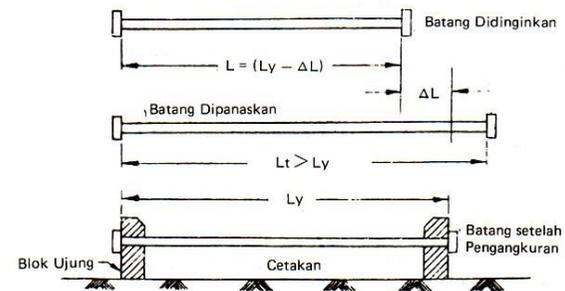
3.5 PRATEGANG TERMO-LISTRIK

Metode prategangan dengan tendon yang dipanaskan, yang dicapai dengan melewati aliran listrik pada kawat yang bermutu tinggi, umumnya disebut sebagai "prategang termolistrik". Di Uni Soviet, metode termolistrik⁸ telah digunakan secara luas sejak tahun 1958 untuk memberikan pratarik pada tulangan baja pada unit pracetak.

Prosesnya terdiri atas pemanasan batang dengan arus listrik sampai temperatur 300-400°C selama 3-5 menit. Batang tersebut mengalami perpanjangan kira-kira 0,3-0,5 persen. Setelah pendinginan, batang tersebut berusaha memperpendek diri dan ini dicegah oleh jepitan ankur pada kedua ujungnya seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.12. Waktu pendinginan diperhitungkan 12-15 menit.

Dengan proses ini, mungkin timbul tegangan awal sebesar 500-600 N/mm³ pada tendon. Beton dicor ke dalam cetakan hanya setelah temperatur kawat turun di bawah 90°C. Metode ini telah didapati lebih ekonomis di Uni Soviet⁹ untuk menarik kawat dibandingkan dengan alat-alat mekanis yang konvensional.

Prategang termolistrik telah pula digunakan di Jerman¹⁰ untuk menarik kawat berpampang lonjong yang diberi perkuatan dengan kekuatan tarik ultimit sebesar 1600



Gambar 3.12 Prategang Elektro-Termis.

N/mm². Diperlukan temperatur kira-kira 460°C untuk menimbulkan suatu tegangan awal sebesar 55 persen kekuatan tarik ultimit tersebut, waktu pemanasannya adalah 40-90 detik pada 30 V dan 300-1100 A. Hubungan empiris untuk perkiraan kebutuhan arus, tegangan, dan daya transformator telah dilaporkan oleh Graduck¹¹.

3.6 PRATEGANG SECARA KIMIA

Penegangan-sendiri atau prategang secara kimia pada beton dimungkinkan dengan dikembangkannya semen yang dapat mengembang oleh Lossier¹² dari Perancis pada tahun 1944. Pada umumnya semen yang dapat mengembang terdiri dari 75 persen semen Portland, 15 persen semen dengan kadar aluminium tinggi, dan 10 persen gips, yang menghasilkan formasi kalsium sulfo aluminat. Pengembangan linear dari semen tersebut kira-kira 3-4 persen. Mikhailov¹³ telah melaporkan pemakaian semen yang dapat mengembang untuk tujuan prategangan di Uni Soviet sejak tahun 1949. Tingkat pengembangannya dapat dikontrol dengan mengubah-ubah kondisi perawatannya.

Oleh karena pengembangan beton dikekang oleh kawat baja bermutu tinggi, maka timbul tegangan tekan pada beton dan kawat baja mengalami tegangan tarik. Penyelidikan-penyelidikan oleh Lim dan Klein¹⁴ telah menetapkan bahwa adalah mungkin untuk memperoleh tegangan tekan awal pada beton sebesar 4-6,5 N/mm² yang dapat diperkecil sampai 3-6 N/mm² setelah susut dan rangkai beton. Tegangan tarik sampai dengan 850 N/mm² ditimbulkan pada baja oleh pengembangan beton. Hasil-hasil penelitian laboratorium atas beberapa tipe elemen prategang secara kimia, seperti balok, pelat, rangka, kolom pipa dan konstruksi kubah paraboloid hiperbolis, telah menunjukkan kelayakan prategang secara kimia.

Dari penelitian-penelitian telah didapati bahwa elemen-elemen struktural yang secara ideal cocok untuk prategang secara kimia adalah pipa, dinding dan pelat tipis, kubah, atau cangkang¹⁵, pelat lipat dan kolom komposit¹⁶, maupun balok serta kolom pracetak¹⁷.

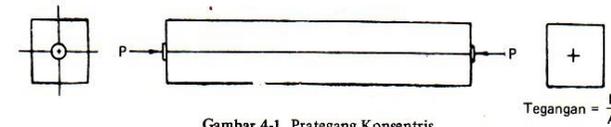
Dalam keadaan sekarang ini, prategang secara kimia dapat diterapkan pada elemen dan sistem struktural di mana jumlah optimum prategangnya relatif rendah. Metode tersebut tidak cocok untuk tingkat prategang yang tinggi serta persentase baja yang tinggi di mana prategang mekanis dapat digunakan secara lebih mudah.

Analisis Prategang dan Tegangan Lentur

f_{atas} dan f_{bawah} = prategang pada beton yang ditimbulkan pada serat paling atas dan serat paling bawah (positif apabila tekan dan negatif apabila tarik)
 y_t dan y_b = jarak antara serat paling atas dan serat paling bawah terhadap titik berat penampang
 i = jari-jari girasi

4.2.1 Tendon Konsentris

Tinjaulah balok beton dengan satu tendon konsentris yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4-1 Prategang Konsentris.

4.1 ASUMSI DASAR

Analisis tegangan-tegangan yang timbul pada suatu elemen struktur beton prategang didasarkan atas asumsi-asumsi berikut: 1. beton adalah suatu material yang elastis serta homogen, 2. di dalam batas-batas tegangan kerja, baik beton maupun baja berperilaku elastis tidak dapat menahan rangkai yang kecil yang terjadi pada kedua material tersebut pada pembebanan terus-menerus, dan 3. suatu potongan datar sebelum melentur dianggap tetap datar meskipun sesudah mengalami lenturan, yang menyatakan suatu distribusi regangan linear pada keseluruhan tinggi batang.

Selama tegangan tarik tidak melampaui batas modulus keruntuhan beton (yang sesuai dengan tahap retakan yang terlihat pada beton), setiap perubahan dalam pembebanan batang menghasilkan perubahan tegangan pada beton saja, satu-satunya fungsi dari tendon prategang adalah untuk memberikan dan memelihara prategang pada beton. Sampai dengan tahap retakan beton yang terlihat, perubahan tegangan baja pada umumnya tidak ditinjau dalam perhitungan, di mana pembebanan merupakan hal kecil yang diabaikan.

4.2 ANALISIS PRATEGANG

Tegangan yang disebabkan oleh prategang saja umumnya merupakan tegangan kombinasi yang disebabkan oleh aksi beban langsung dan lenturan yang dihasilkan oleh beban yang ditempatkan secara eksentris. Tegangan pada beton dievaluasi dengan memakai hubungan yang diketahui untuk tegangan kombinasi yang dipakai dalam hal kolom.

Notasi-notasi serta perjanjian tanda berikut dipakai untuk analisis prategang.

- P = gaya prategang (positif apabila menghasilkan tekanan langsung)
- e = eksentrisitas gaya prategang
- M = $P \cdot e$ = momen
- A = luas potongan melintang batang beton
- I = momen inersia potongan terhadap titik beratnya (momen inersia)
- Z_t dan Z_b = momen penampang serat paling atas dan paling bawah

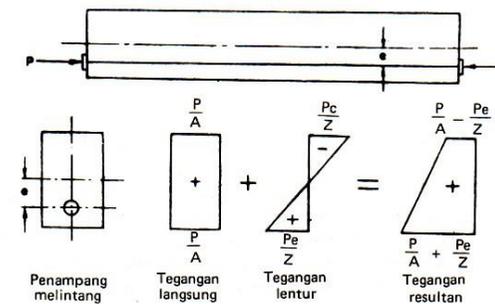
Prategang seragam pada beton = P/A yang berupa tekan pada seluruh tinggi balok. Pada umumnya beban-beban yang dipakai dan beban mati balok menimbulkan tegangan tarik terhadap bidang bagian bawah dan ini diimbangi dengan lebih efektif dengan memakai tendon eksentris.

4.2.2 Tendon Eksentris

Gambar 4.2 memperlihatkan sebuah balok beton yang mengalami suatu gaya prategang eksentris sebesar P yang ditempatkan dengan eksentrisitas e . Tegangan-tegangan yang ditimbulkan pada serat-serat bagian atas dan bagian bawah balok diperoleh dengan hubungan:

$$f_{bawah} = \left(\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z_b} \right) = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{ey_b}{i^2} \right)$$

$$f_{atas} = \left(\frac{P}{A} - \frac{Pe}{Z_t} \right) = \frac{P}{A} \left(1 - \frac{ey_t}{i^2} \right)$$

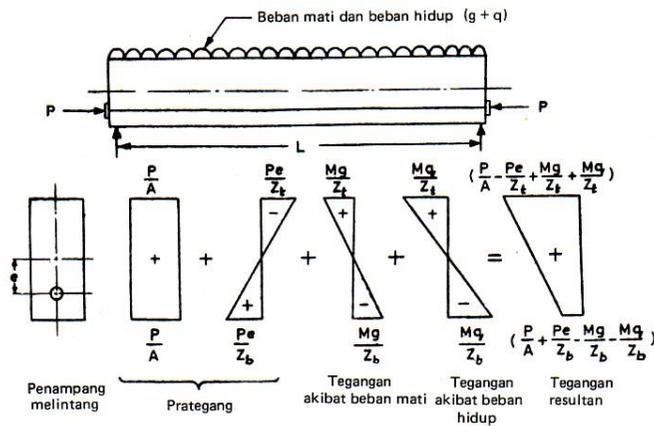


Gambar 4-2 Prategang Eksentris.

4.3 TEGANGAN RESULTAN PADA SUATU PENAMPANG

Balok beton, yang diperlihatkan dalam Gambar 4.3, memikul beban-beban hidup dan mati yang terbagi rata dengan intensitas q dan g . Balok diprategangkan dengan suatu tendon lurus yang membawa suatu gaya prategang P dengan eksentrisitas e . Tegangan resultan pada beton pada suatu penampang diperoleh dengan superposisi pengaruh prategang dan tegangan-tegangan lentur yang ditimbulkan oleh beban-beban tersebut. Kalau M_q dan M_g merupakan momen akibat beban hidup dan beban mati pada penampang tengah bentang,

$$M_q = \left(\frac{q L^2}{8} \right) \quad M_g = \left(\frac{g L^2}{8} \right)$$



Gambar 4.3 Distribusi Tegangan akibat Prategang Eksentris, Beban Mati, dan Beban Hidup.

Tegangan-tegangan resultan pada serat-serat beton paling atas dan paling bawah pada suatu penampang tertentu diperoleh sebagai:

$$f_{atas} = \left(\frac{P}{A} - \frac{Pe}{Z_t} \right) + \left(\frac{M_g}{Z_t} + \frac{M_q}{Z_t} \right)$$

$$f_{bawah} = \left(\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z_b} \right) - \left(\frac{M_g}{Z_b} - \frac{M_q}{Z_b} \right)$$

Dalam hal batang prategang, luas penampang melintang baja bermutu tinggi merupakan suatu persentase yang sangat kecil terhadap luas beton total, sehingga perhitungan tegangan pada umumnya didasarkan atas sifat-sifat penampang melintang beton nominal. Pemakaian penampang beton ekuivalen, walaupun penting dalam menafsirkan hasil-hasil pengujian dan penyelidikan-penyelidikan eksperimental, secara umum tidak banyak mempengaruhi tegangan-tegangan yang dihasilkan oleh pemakaian penampang beton nominal. Hal ini dilukiskan dengan Contoh 4.1.

CONTOH 4.1

Tinjaulah suatu balok beton dengan penampang persegi panjang, lebar 150 mm dan tinggi 300 mm, yang mendapat prategang oleh 4 kawat bermutu tinggi dengan diameter 5 mm yang ditegangkan sampai 1200 N/mm². Kawat-kawat ditempatkan dengan eksentrisitas 50 mm. Tegangan-tegangan yang ditimbulkan pada bidang bagian bawah balok akan diteliti dengan meninjau penampang "beton nominal" serta "beton ekuivalen".

Gaya prategang = (1200 × 80) = 96.000 N. Penampang beton nominal mempunyai $A = 45.000 \text{ mm}^2$ dan $I = 3375 \times 10^5 \text{ mm}^4$.

Jadi tegangan pada sofit penampang = $\left(\frac{2 \times 96.000}{45.000} \right) = 4,27 \text{ N/mm}^2$. Untuk penampang beton ekuivalen, dengan menganggap rasio modulus

$$\alpha_e = 6,$$

$$A_e = 45.000 + (6 - 1) 80$$

$$= 45.400 \text{ mm}^4$$

Kedudukan titik berat penampang terhadap bidang bagian bawah = 149 mm. $I_e = (3375 \times 10^5) + (150 \times 300 \times 1^2) + (400 \times 49^2) = 3385 \times 10^5 \text{ mm}^4$.

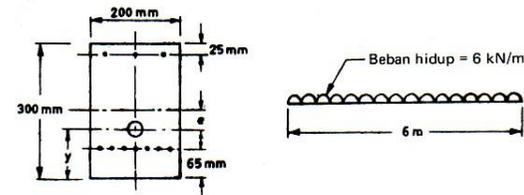
$$\text{Tegangan pada sofit} = \left[\frac{96.000}{45.400} + \frac{(96.000 \times 49)}{3385 \times 10^5} \right]$$

$$= 4,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase Perbedaan} = \left(\frac{0,07}{4,27} \times 100 \right) \approx 1,64\%$$

CONTOH 4.2

Suatu penampang balok beton persegi panjang dengan tinggi 30 cm dan lebar 20 cm diberi prategang dengan 15 kawat berdiameter 5 mm yang lokasinya 6,5 cm dari tepi bawah balok dan 3 kawat dengan diameter 5 mm, 2,5 cm dari tepi atas. Dengan menganggap bahwa besarnya prategang pada kawat baja adalah 840 N/mm², hitunglah tegangan-tegangan pada serat paling luar dari potongan tengah-tengah bentang apabila balok tersebut memikul beratnya sendiri sepanjang bentang 6 m. Kalau suatu beban hidup terbagi rata sebesar 6 kN/m diberikan, hitungan tegangan kerja maksimum pada beton. Kerapatan beton adalah 24 kN/m³.



Gambar 4.4 Balok Prategang dengan Penampang Persegi Panjang yang Memikul Beban Hidup.

Dari Gambar 4.4,
Jarak titik berat gaya prategang terhadap dasar, y

$$= \left[\frac{(15 \times 65) + (3 \times 275)}{18} \right] = 100 \text{ mm}$$

Eksentrisitas $e = (150 - 100) = 50 \text{ mm}$
 Gaya prategang $P = (840 \times 18 \times 19,7) = 3 \times 10^5 \text{ N}$
 Luas penampang melintang $A = (300 \times 200) = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2$

Momen inersia $I = \left(\frac{200 \times 300^3}{12} \right) = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$

Modulus penampang (Z_t dan Z_b) $= \left(\frac{45 \times 10^7}{150} \right) = 3 \times 10^6 \text{ mm}^3$

Berat balok sendiri $= (0,3 \times 0,2 \times 24) = 1,44 \text{ kN/m}$

Momen akibat berat sendiri $M_g = \left(\frac{1,44 \times 6^2}{8} \right) = 6,48 \text{ kNm}$

Momen akibat beban hidup $M_q = \left(\frac{1,44 \times 6^2}{8} \right) = 27 \text{ kNm}$

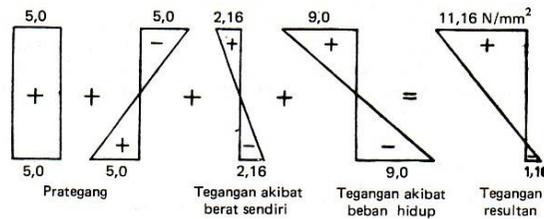
Tegangan langsung akibat prategang $\left(\frac{P}{A} \right) = \left(\frac{3 \times 10^5}{6 \times 10^4} \right) = 5 \text{ N/mm}^2$

Tegangan lentur akibat prategang $\left(\frac{Pe}{Z} \right) = \left(\frac{3 \times 10^5 \times 50}{3 \times 10^6} \right) = 5 \text{ N/mm}^2$

Tegangan akibat berat sendiri $M_g/Z = \left(\frac{6,48 \times 10^6}{3 \times 10^6} \right) = 2,16 \text{ N/mm}^2$

Tegangan akibat beban hidup $M_q/Z = \left(\frac{27 \times 10^6}{3 \times 10^6} \right) = 9 \text{ N/mm}^2$

Tegangan resultan yang disebabkan oleh (berat sendiri + prategang + beban hidup) ditunjukkan dalam Gambar 4.5. Tegangan kerja maksimum pada beton = $11,16 \text{ N/mm}^2$ (tekan).

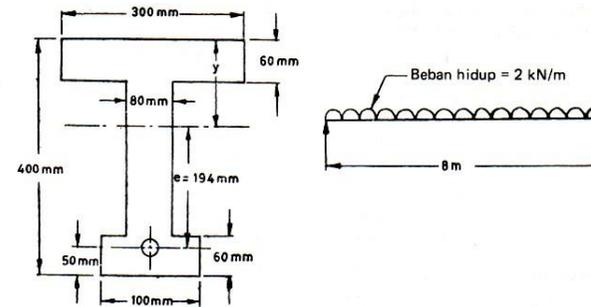


Gambar 4.5 Analisis Tegangan pada Tengah-tengah Bentang.

CONTOH 4.3

Sebuah balok dengan penampang I yang tidak simetris dipakai untuk memikul beban 2 kN/m sepanjang bentang 8 m . Rincian penampangnya adalah: flens atas, lebar 300 mm dan tebal 60 mm ; flens bawah, lebar 100 mm dan tebal 60 mm ; tebal badan 80 mm ; tinggi balok seluruhnya $= 400 \text{ mm}$. Pada pertengahan bentang, gaya prategang efektif sebesar 100 kN diletakkan pada 50 mm dari sofit balok. Hitunglah tegangan-tegangan pada penampang di tengah-tengah balok untuk kondisi pembebanan berikut:

- Prategang + berat sendiri
- Prategang + berat sendiri + beban hidup



Gambar 4.6 Balok Prategang dengan Penampang-I Tidak simetris yang Memikul Beban Hidup.

Dari Gambar 4.6,

Gaya prategang $P = 100 \text{ kN}$

Luas beton $A = 46.400 \text{ mm}^2$

Jarak titik berat penampang dari tepi atas $y = 156 \text{ mm}$

Momen inersia $I = 75,8 \times 10^7 \text{ mm}^4$

$Z_t = \left(\frac{75,8 \times 10^7}{156} \right) = 485 \times 10^4 \text{ mm}^3$

$Z_b = \left(\frac{75,8 \times 10^7}{244} \right) = 310 \times 10^4 \text{ mm}^3$

$\bar{e} = (0,0464 \times 1 \times 24) = 1,12 \text{ kN/m}$

$M_g = (0,125 \times 1,12 \times 8^2) = 8,96 \text{ kNm}$

$M_q = (0,125 \times 2 \times 8^2) = 16 \text{ kNm}$

Tegangan-tegangan pada tengah-tengah bentang

Tipe tegangan	Pada serat tepi atas N/mm^2	Pada serat tepi bawah N/mm^2
Prategang	$P/A = +2,15$	$P/A = +2,15$
	$PE/Z_t = -4,0$	$PE/Z_b = +6,25$
Tegangan akibat berat sendiri	$M_g/Z_t = +1,85$	$M_g/Z_b = -2,9$
Tegangan akibat beban hidup	$M_q/Z_t = +3,3$	$M_q/Z_b = -5,15$

+ Tekan - Tarik

Tegangan-tegangan resultan:

- (Prategang + tegangan akibat berat sendiri) = 0 , dan $+5,5 \text{ N/mm}^2$
- (Prategang + tegangan akibat berat sendiri + tegangan akibat beban hidup) = $+3,3 \text{ N/mm}^2$, dan $+0,35 \text{ N/mm}^2$

CONTOH 4.4

Sebuah balok beton persegi panjang dengan lebar 250 mm dan tinggi 600 mm diberi prategang oleh batang bermutu tinggi dengan diameter 14 mm yang terletak 200 mm dari sofit balok. Kalau tegangan efektif pada kawat sama dengan 700 N/mm^2 , berapakah

momen lentur maksimum yang dapat diberikan pada penampang tersebut tanpa mengakibatkan tegangan tarik pada sofit balok?

$$A = (250 \times 600) = 15 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$Z = \left(\frac{250 \times 600^2}{6} \right) = 15 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$A_s = \left(\frac{\pi \times 4 \times 14^2}{4} \right) = 616 \text{ mm}^2$$

$$e = 100 \text{ mm}$$

$$P = (616 \times 700) = 431200 \text{ N}$$

$$(P/A) = 2,87 \text{ N/mm}^2, (Pe/Z) = 2,87 \text{ N/mm}^2$$

Prategang pada tepi bawah balok = $(2,87 + 2,87) = 5,74 \text{ N/mm}^2$. Kalau M = momen maksimum pada penampang untuk mencapai tegangan tarik nol pada tepi bawah.

$$M/Z = 5,74$$

$$M = (5,74 \times 15 \times 10^6)$$

$$= 86,1 \times 10^6 \text{ N mm}$$

$$= 86,1 \text{ kN m}$$

CONTOH 4.5

Sebuah balok beton prategang dengan penampang lebar 200 mm dan tinggi 300 mm dipakai di atas bentangan efektif 6 m untuk memikul beban yang diberikan sebesar 4 kN/m. Kerapatan beton sama dengan 24 kN/m^3 .

Pada potongan di tengah bentang balok, carilah besarnya:

- gaya prategang konsentris yang diperlukan untuk mencapai tegangan nol pada sofit apabila balok tersebut dibebani secara penuh; dan
- gaya prategang eksentris yang terletak 100 mm dari dasar balok, yang akan menjadikan nol tegangan-tegangan pada serat paling bawah sebagai akibat pembebanan.

$$A = (200 \times 300) = 6 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$Z_b = Z_t = \left(\frac{200 \times 300^2}{6} \right) = 3 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$g = (0,2 \times 0,3 \times 24) = 1,44 \text{ kN/m}$$

$$M_g = (0,125 \times 1,44 \times 6^2) = 6,48 \text{ kN m}$$

$$M_q = (0,125 \times 4 \times 6^2) = 18 \text{ kN m}$$

Tegangan tarik pada serat paling bawah yang disebabkan oleh beban mati dan beban hidup = $\left[\frac{(6,48 + 18) 10^6}{3 \times 10^6} \right] = 8,16 \text{ N/mm}^2$

- Kalau P = gaya prategang konsentris, maka untuk mencapai tegangan nol pada sofit balok di bawah pembebanan

$$\frac{P}{A} = 8,16$$

$$\therefore P = (8,16 \times 6 \times 10^4) = 489,6 \text{ kN}$$

- Kalau P = gaya prategang eksentris ($e = 50 \text{ mm}$), untuk mencapai tegangan nol pada sofit balok di bawah pembebanan

$$(P/A) + (Pe/Z_b) = 8,16$$

$$\therefore P \left(\frac{1}{6 \times 10^4} + \frac{50}{3 \times 10^6} \right) = 8,16$$

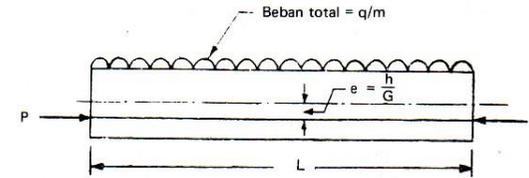
$$\therefore P = 244,8 \text{ kN}$$

Besarnya gaya-gaya prategang yang telah dihitung jelas menunjukkan keuntungan prategang eksentris pada batang lentur yang menerima beban transversal.

4.4 GARIS TEKANAN ATAU GARIS DESAKAN

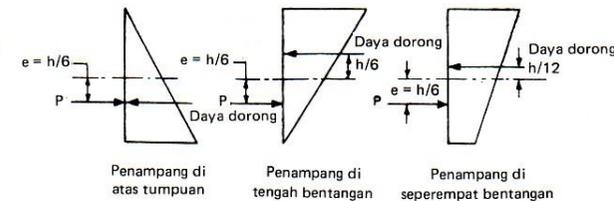
Pada sesuatu penampang tertentu suatu balok beton prategang, pengaruh kombinasi dari gaya prategang dan beban luar yang diterapkan akan menghasilkan suatu distribusi tegangan beton yang dapat digabungkan menjadi suatu gaya tunggal. Tempat kedudukan titik-titik tangkap gaya resultan ini pada sesuatu struktur disebut "garis tekanan atau garis desakan". Konsep garis tekanan sangat berguna untuk memahami mekanisme pemikul beban suatu penampang beton prategang.

Dalam hal batang beton prategang, lokasi garis tekanan tergantung pada besar serta arah momen-momen yang diberikan pada prategang melintangnya dan besar serta distribusi tegangan yang disebabkan oleh gaya prategang. Perhatikan suatu balok beton yang ditunjukkan dalam Gambar 4.7, yang diberikan prategang oleh gaya P yang bekerja dengan eksentrisitas e . Balok tersebut memikul beban terbagi rata (termasuk berat sendiri) dengan intensitas q per satuan panjang.



Gambar 4.7 Balok dengan Tendon Eksentris.

Besar beban tersebut adalah sedemikian rupa sehingga tegangan pada serat paling bawah pada penampang tengah-tengah bentangan balok sama dengan nol. Gambar 4.8 menunjukkan distribusi tegangan resultan pada penampang di atas tumpuan, penampang di tengah dan seperempat bentangan balok.



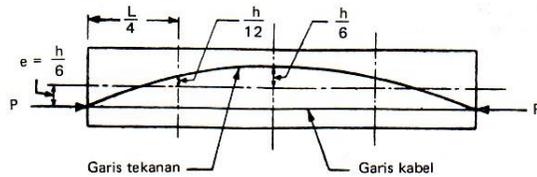
Gambar 4.8 Distribusi Tegangan pada Berbagai Penampang sepanjang Bentangan.

Pada penampang di atas tumpuan, karena tidak terdapat tegangan lentur yang dihasilkan oleh beban luar, garis tekanan berimpit dengan titik berat baja yang terletak dengan eksentrisitas $h/6$. Pada tengah-tengah penampang bentang, beban luar adalah sedemikian rupa sehingga tegangan resultan yang ditimbulkan menjadi maksimum pada serat paling atas dan nol pada serat paling bawah. Dapat dilihat dengan mudah bahwa untuk penam-

pang ini, garis tekanan telah bergeser ke arah serat bagian atas sebanyak $h/3$ dari kedudukannya semula.

Momen luar pada penampang seperempat bentang adalah lebih kecil, sehingga pergeseran garis tekanan dengan demikian juga lebih kecil, yaitu sama dengan $h/4$ dari kedudukannya semula. Dengan cara yang sama, dapat ditunjukkan bahwa suatu beban terbagi rata yang lebih besar akan menghasilkan pergeseran garis tekanan yang lebih tinggi lagi pada penampang di tengah-tengah dan seperempat bentang. Lokasi garis tekanan pada balok ditunjukkan dalam Gambar 4.9. Pengamatan-pengamatan ini mengarah kepada prinsip yang penting berikut ini:

"Suatu perubahan dalam momen luar dalam daerah elastis suatu balok beton prategang lebih mengakibatkan pergeseran garis tekanan daripada peningkatan gaya resultan pada balok".



Gambar 4.9 Lokasi Garis Tekanan pada Balok Prategang.

Hal ini bertentangan dengan penampang balok beton bertulang di mana suatu penambahan momen luar akan mengakibatkan suatu penambahan yang sesuai pada gaya tarik dan gaya tekan. Peningkatan gaya resultan ini disebabkan oleh jarak lengan antara gaya-gaya yang lebih kurang konstan, yang dicirikan oleh sifat penampang komposit. Pada dasarnya, mekanisme pemikulan beban terdiri dari gaya konstan dengan jarak yang berubah dengan jarak lengan konstan yang berlaku pada penampang beton bertulang. Namun, apabila suatu batang beton prategang retak, ia berperilaku sama dengan penampang beton bertulang.

CONTOH 4.6

Sebuah balok beton prategang dengan penampang persegi panjang lebar 120 mm dan tinggi 300 mm memikul beban terbagi rata 4 kN/m, termasuk berat sendiri balok. Bentang efektif balok adalah 9 m. Balok tersebut diberi prategang konsentris dengan suatu kabel yang memikul gaya sebesar 180 kN. Tentukan kedudukan garis tekanan pada balok tersebut.

Gaya prategang, $P = 180 \text{ kN}$

Eksentrisitas, $e = 0$

$$A = 36 \times 10^3 \text{ mm}^2, Z_t = Z_b = 18 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Momen lentur pada tengah-tengah bentang = $(0,125 \times 4 \times 9^2) = 18 \text{ kNm}$

$$\text{Tegangan langsung } P/A = \left(\frac{180 \times 10^3}{36 \times 10^3} \right) = 5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan lentur } M/Z = \left(\frac{18 \times 10^6}{18 \times 10^5} \right) = 10 \text{ N/mm}^2$$

Tegangan-tegangan resultan pada penampang di tengah bentang:

Tepi atas = $(5 + 10) = 15 \text{ N/mm}^2$ (Tekan)

Tepi bawah = $(5 - 10) = -5 \text{ N/mm}^2$ (Tarik)

Kalau N = gaya desak resultan pada penampang, dan e = eksentrisitas yang bersesuaian (pergeseran garis tekanan), maka

$$N/A + Ne/Z = 15$$

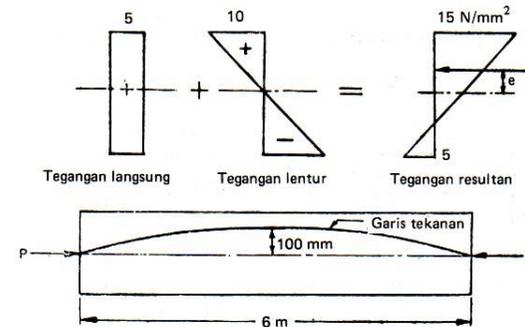
Tetapi $N = 180 \times 10^3 \text{ N}$

$$A = 36 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

(diselesaikan $e = 100 \text{ mm}$)

$$Z = 18 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Diagram distribusi tegangan resultan dan lokasi garis tekanan ditunjukkan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Distribusi Tegangan dan Lokasi Garis Tekanan pada Balok Prategang.

CONTOH 4.7

Sebuah balok beton prategang dengan ukuran penampang lebar 120 mm dan tinggi 300 mm dipakai di atas bentang efektif 6 m untuk memikul beban terbagi rata 4 kN/m, termasuk berat sendiri balok. Balok tersebut diberi prategang dengan kabel lurus yang membawa gaya sebesar 180 kN, yang terletak pada eksentrisitas 50 mm. Tentukan lokasi garis desakan pada balok dan gambarkan kedudukannya pada penampang di seperempat dan tengah-tengah bentang.

$P = 180 \text{ kN}$

$e = 50 \text{ mm}$

$$A = 36 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$Z = 18 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Tegangan akibat gaya prategang

$$P/A = \frac{180 \times 10^3}{36 \times 10^3} = +5 \text{ N/mm}^2$$

$$Pe/Z = \frac{180 \times 10^3 \times 50}{18 \times 10^5} = +5 \text{ N/mm}^2$$

Momen lentur pada tengah-tengah bentang = $0,125 \times 4 \times 6^2 = 18 \text{ kNm}$

$$\text{Tegangan-tegangan lentur pada tepi atas dan bawah} = \frac{18 \times 10^6}{18 \times 10^5} = \pm 10 \text{ N/mm}^2$$

Tegangan-tegangan resultan pada penampang tengah:

$$\text{Pada tepi atas} = (5 - 5 + 10) = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pada tepi bawah} = (5 + 5 - 10) = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Pergeseran garis tekanan dari garis kabel} &= \frac{M}{P} \\ &= \frac{18 \times 10^6}{18 \times 10^4} = 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen lentur pada potongan seperempat bentang} &= \frac{3}{32} qL^2 = \frac{3}{32} \times 4 \times 6^2 \\ &= 13,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\text{Tegangan lentur pada tepi atas dan bawah} = \frac{13,5 \times 10^6}{18 \times 10^5} = 7,5 \text{ N/mm}^2$$

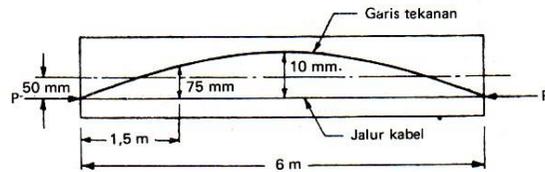
Tegangan-tegangan resultan pada penampang seperempat bentang:

$$\text{Pada tepi atas} = (5 - 5 + 7,5) = 7,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pada tepi bawah} = (5 + 5 - 7,5) = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pergeseran garis tekanan dari garis kabel} = \frac{M}{P} = \frac{13,5 \times 10^6}{18 \times 10^4} = 75 \text{ mm}$$

Lokasi garis tekanan ditunjukkan dalam Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Lokasi Garis Tekanan pada Balok Prategang.

CONTOH 4.8

Sebuah balok beton persegi panjang dengan lebar 250 mm dan tinggi 300 mm diberi prategang dengan gaya sebesar 540 kN dengan eksentrisitas konstan 60 mm. Balok tersebut memikul beban terpusat sebesar 68 kN di pertengahan bentang yang panjangnya 3 m. Tentukan lokasi garis tekanan pada penampang di tengah, seperempat bentang, dan di atas tumpuan balok. Berat sendiri blok diabaikan.

$$\begin{aligned} P &= 540 \text{ kN}, & A &= 250 \times 300 = 75 \times 10^3 \text{ mm}^2 \\ e &= 60 \text{ mm}, & Z &= \frac{250 \times 300^2}{6} = 375 \times 10^4 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pada tengah bentang } M_q &= (0,25 \times 68 \times 3) = 51 \text{ kNm} \\ \text{Pada seperempat bentang } M_q &= (0,125 \times 68 \times 3) = 25,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

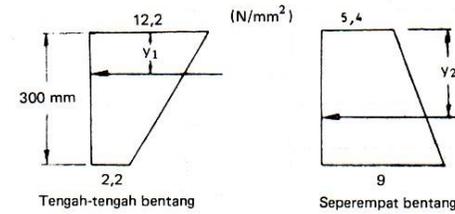
Tegangan-tegangan yang disebabkan oleh gaya prategang:

$$\begin{aligned} P/A &= \frac{54 \times 10^4}{75 \times 10^3} = 7,2 \text{ N/mm}^2 \\ Pe/Z &= \frac{54 \times 10^4 \times 60}{37 \times 10^4} = 8,6 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Tegangan-tegangan yang disebabkan oleh beban luar:

$$\begin{aligned} \text{Pada tengah bentang } M_q/Z &= \frac{51 \times 10^6}{375 \times 10^4} = 13,6 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Pada seperempat bentang } M_q/Z &= \frac{25,5 \times 10^6}{375 \times 10^4} = 6,8 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

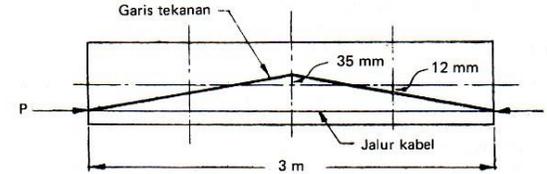
Kedudukan gaya desak resultan terhadap serat tepi atas balok diperoleh dari Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Distribusi Tegangan pada Penampang Tengah-tengah dan Seperempat Bentang.

$$\begin{aligned} y_1 &= \left[\frac{(300 \times 2,2) 150 + (\frac{1}{2} \times 300 \times 10) 100}{660 + 1500} \right] = 115 \text{ mm} \\ y_2 &= \left[\frac{(5,4 \times 300) 150 + (\frac{1}{2} \times 300 \times 3,6) 200}{1620 + 540} \right] = 162 \text{ mm} \end{aligned}$$

Lokasi garis tekanan serta garis kabel ditunjukkan dalam Gambar 4.13.



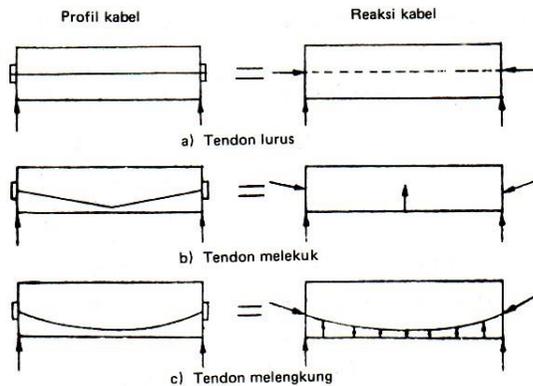
Gambar 4.13 Lokasi Garis Tekanan dalam Balok Prategang.

4.5 KONSEP PERIMBANGAN BEBAN (LOAD BALANCING)

Adalah mungkin untuk memilih profil kabel pada batang beton prategang sedemikian rupa sehingga komponen transversal gaya kabel mengimbangi jenis beban luar tertentu. Ini dapat dilukiskan secara langsung dengan meninjau benda-benda beton dengan tendon yang diganti oleh gaya-gaya yang bekerja pada balok beton tersebut seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.14.

Berbagai tipe reaksi kabel terhadap suatu batang beton tergantung pada bentuk profil kabel. Bagian kabel yang lurus tidak menimbulkan reaksi apa pun kecuali pada ujung-ujungnya, sedangkan kabel yang melengkung menimbulkan beban terbagi rata. Sudut tajam pada suatu kabel menimbulkan beban terpusat. Konsep perimbangan beban berguna dalam pemilihan profil tendon yang dapat memberikan sistem gaya yang paling disukai pada beton.

Pada umumnya persyaratan ini akan dipenuhi kalau profil kabel pada suatu batang beton prategang sesuai dengan bentuk diagram momen lentur yang dihasilkan oleh beban



Gambar 4.14 Reaksi Kabel terhadap Balok.

luar. Jadi, kalau balok tersebut memikul dua beban terpusat, kabelnya harus mengikuti profil berbentuk trapesium. Kalau balok tadi memikul beban terbagi rata, tendon yang bersesuaian harus mengikuti profil parabolis. Prinsip perimbangan beban diperjelas lebih lanjut dengan contoh-contoh berikut.

CONTOH 4.9

Sebuah balok prategang persegi panjang dengan lebar 150 mm dan tinggi 300 mm digunakan di atas bentang efektif sepanjang 10 m. Kabel, yang mempunyai eksentrisitas nol di atas tumpuan-tumpuannya serta berubah-ubah sampai mencapai 50 mm di tengah-tengah, membawa suatu gaya prategang efektif sebesar 500 kN. Carilah besarnya beban terpusat Q yang berkedudukan di tengah-tengah bentang untuk kondisi-kondisi berikut ini pada penampang di tengah:

- bila beban melawan pengaruh lenturan dari gaya prategang (dengan mengabaikan berat sendiri balok),
- bila garis tekanan melalui kern atas penampang pada aksi beban luar, berat sendiri, dan prategang.

$$A = (150 \times 300) = 45 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$Z = \frac{(150 \times 300^2)}{6} = 225 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Berat sendiri balok, $g = (0,15 \times 0,3 \times 24) = 1,08 \text{ kN/m}$
 $P = 500 \text{ kN}$ $e = 50 \text{ mm}$

Kalau kemiringan kabel terhadap sumbu horisontal adalah θ , dan Q = beban terpusat di tengah-tengah bentang, maka untuk perimbangan beban,

- $Q = 2P \sin \theta = \left(\frac{2 \times 500 \times 50}{5 \times 1000} \right) = 10 \text{ kN}$
- Momen akibat berat sendiri = $(0,125 \times 1,08 \times 10^2) = 13,5 \text{ kNm}$

Tegangan akibat-berat sendiri = $\left(\frac{13,5 \times 10^6}{225 \times 10^4} \right) = +6 \text{ N/mm}^2$

Tegangan akibat prategang = $(P/A + Pe/Z)$
 $= \left[\frac{500 \times 10^3}{45 \times 10^3} \right] + \left[\frac{500 \times 10^3 \times 50}{225 \times 10^4} \right]$

Tegangan pada serat paling bawah = $22,22 \text{ N/mm}^2$

Kalau Q = beban terpusat di tengah-tengah bentang, maka momen di tengah-tengah bentang

$$= (Q \times 10)/4 = 2,5 Q$$

Tegangan lentur = $\frac{(2,5 Q) \times 10^6}{225 \times 10^4}$

Kalau garis tekanan melalui kern atas penampang tersebut, maka tegangan pada serat paling bawah = 0

$$\left[\frac{2,5 Q \times 10^6}{225 \times 10^4} \right] + 6 = 22,22$$

$$Q = 14,60 \text{ kN}$$

CONTOH 4.10

Sebuah balok beton persegi panjang dengan lebar 300 mm dan tinggi 800 mm memikul dua beban terpusat masing-masing sebesar 20 kN pada sepertiga bentang yang panjangnya 9 m.

- Rencanakan suatu profil kabel yang sesuai. Apabila eksentrisitas profil kabel tersebut untuk sepertiga bagian tengah balok sama dengan 100 mm, hitunglah gaya prategang yang diperlukan untuk mengimbangi pengaruh lenturan dari beban-beban terpusat dengan mengabaikan berat sendiri balok.
- Untuk profil kabel yang sama, carilah gaya efektif pada kabel bila tegangan resultan yang disebabkan oleh berat sendiri, beban-beban yang diberikan serta gaya prategang sama dengan nol pada serat paling bawah dari penampang tengah-tengah bentang. (Misalkan $D_c = 24 \text{ kN/m}^3$.)

- Suatu profil kabel berbentuk trapesium dipilih karena diagram momen lentur yang disebabkan oleh kedua beban terpusat berbentuk trapesium.

Ditentukan $Q = 20 \text{ kN}$, $e = 100 \text{ mm}$, $L = 9 \text{ m}$, $Z = 32 \times 10^6 \text{ mm}^3$,
 P = Gaya Prategang

$$Pe = QL/3, \text{ Jadi } P = QL/3e = \frac{20 \times 9000}{3 \times 100} = 600 \text{ kN}$$

- Berat sendiri balok, $g = (0,3 \times 0,8 \times 24) = 5,76 \text{ kN/m}$
Momen akibat berat sendiri, $M_g = (0,125 \times 5,76 \times 9^2) = 58,32 \text{ kNm}$

Tegangan lentur = $\frac{58,32 \times 10^6}{32 \times 10^6} = 1,82 \text{ N/mm}^2$

Momen di tengah-tengah yang disebabkan oleh beban
 $= QL/3 = (20 \times 9)/3 = 60 \text{ kNm}$

Tegangan akibat beban = $\frac{90 \times 10^6}{32 \times 10^6} = 1,875 \text{ N/mm}^2$

Tegangan tarik total pada serat paling bawah = $1,82 + 1,875 = 3,695 \text{ N/mm}^2$

Jika P = gaya prategang yang diperlukan pada kabel,
 $e = 100 \text{ mm}$

$$A = (300 \times 800) = 24 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$(P/A + Pe/Z) = 3,695$$

$$P(1/24 \times 10^4 + 100/32 \times 10^6) = 3,695$$

$$\text{Jadi } P = 507 \times 10^3 \text{ N} = 507 \text{ kN}$$

CONTOH 4.11

Sebuah balok beton prategang memikul beban sebesar 4 kN/m sepanjang bentang efektif 10 m. Balok tersebut mempunyai penampang persegi panjang dengan lebar 200 mm dan tinggi 600 mm. Carilah gaya prategang efektif pada kabel bila bentuk profilnya parabolis dengan eksentrisitas 100 mm di tengah dan nol pada ujung-ujungnya, untuk kondisi-kondisi berikut:

- (a) pengaruh lenturan gaya prategang dihilangkan oleh beban yang diberikan untuk penampang di tengah bentang (dengan mengabaikan berat sendiri balok).
 - (b) tegangan resultan akibat berat sendiri, beban yang diberikan, serta gaya prategang sama dengan nol pada sofit balok pada penampang tengah-tengah bentang (misalkan $D_c = 24 \text{ kN/m}^3$).
- $A = 12 \times 10^4 \text{ mm}^2$ $e = 100 \text{ mm}$
 $Z = 12 \times 10^6 \text{ mm}^3$ $q = 4 \text{ kN/m}$

Berat sendiri balok, $g = (0,2 \times 0,6 \times 24) = 2,88 \text{ kN/m}$

(a) Kalau $P =$ gaya prategang $Pe = (qL^2/8)$

$$\therefore P = \left(\frac{qL^2}{8e} \right) = \left(\frac{4 \times 10^2}{8 \times 0,1} \right) = 500 \text{ kN}$$

(b) Beban total pada balok = $(2,88 + 4,00) = 6,88 \text{ kN/m}$

Momen lentur pada tengah bentang, $M = (0,125 \times 6,88 \times 10^2) = 86 \text{ kNm}$

Supaya tegangan pada serat paling bawah menjadi nol,

$$(P/A + Pe/Z) = M/Z$$

$$[(P/12 \times 10^4) + (P \times 100/12 \times 10^6)] = 86 \times 10^6/12 \times 10^6$$

$$\text{Jadi } P = 430 \times 10^3 \text{ N} = 430 \text{ kN}$$

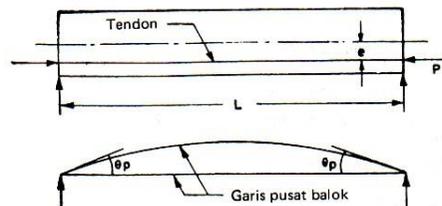
4.6 TEGANGAN PADA TENDON

4.6.1 Pengaruh Pembebanan terhadap Tegangan Tarik pada Tendon

Sebuah batang prategang mengalami deformasi yang disebabkan oleh aksi gaya prategang dan beban-beban transversal yang bekerja pada batang tersebut. Sebagai akibatnya, kelengkungan kabel berubah yang menyebabkan sedikit perubahan tegangan pada tendon. Dengan memperhatikan Gambar 4.15 di mana sebuah balok beton dengan bentang L diberi prategang oleh suatu kabel yang membawa gaya efektif P dengan eksentrisitas e , maka rotasi θ_p pada tumpuan yang disebabkan oleh pencembungan balok diperoleh dengan menerapkan teori Mohr sebagai,

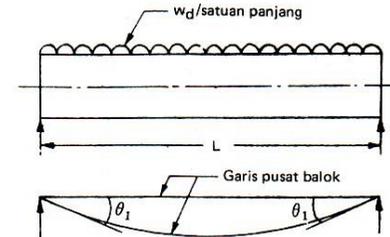
$$\theta_p = \frac{\text{Luas diagram momen lentur}}{\text{Ketegaran lentur}} = \left(\frac{PeL}{2EI} \right)$$

di mana $EI =$ ketegaran lentur (flexural rigidity) balok.



Gambar 4.15 Pengaruh Gaya Prategang terhadap Rotasi Balok Beton.

Kalau balok tersebut memikul beban terbagi rata total sebesar w_d per satuan panjang, maka rotasi θ_1 pada tumpuan akibat pelengkungan balok dievaluasi dari Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Pengaruh Beban Transversal terhadap Rotasi Balok Beton.

$$\theta_1 = \left(\frac{\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times L \times w_d L^2 / 8}{EI} \right) = \left(\frac{w_d L^3}{24 EI} \right)$$

Bila rotasi akibat beban lebih besar daripada yang disebabkan oleh gaya prategang, maka rotasi bersih θ ditentukan oleh,

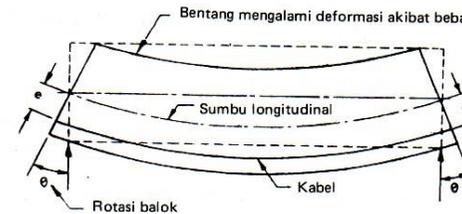
$$\theta = (\theta_1 - \theta_p)$$

Dengan memperhatikan Gambar 4.17,

Perpanjangan kabel total = $2e\theta$

Regangan pada kabel = $(2e\theta/L)$

Kenaikan tegangan akibat pembebanan = $\frac{(E_s \cdot 2e\theta)}{L}$



Gambar 4.17 Rotasi Balok akibat Aksi Beban.

Pada umumnya, di dalam daerah elastis, sesuatu penambahan pembebanan pada suatu batang prategang tidak mengakibatkan perubahan yang berarti dalam tegangan baja. Dengan kata lain, tegangan pada baja lebih kurang konstan di dalam daerah elastis suatu batang prategang. Pengamatan yang penting ini dilukiskan dengan contoh berikut.

CONTOH 4.12

Potongan melintang sebuah balok beton prategang yang digunakan sepanjang bentang 6 m mempunyai lebar 100 mm dan tinggi 300 mm. Tegangan awal pada tendon yang terletak

pada suatu eksentrisitas konstan sebagai 50 mm sama dengan 1000 N/mm². Luas penampang tendon sama dengan 100 mm². Carilah peningkatan persentase tegangan pada kawat apabila balok tersebut memikul beban hidup sebesar 4 kN/m. Kerapatan beton sama dengan 24 kN/m³.

Modulus elastisitas beton = 36 kN/m²
 Modulus elastisitas baja = 210 kN/m²

$$\text{Momen inersia } I = \frac{100 \times 300^3}{12} = 225 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{Gaya prategang } P = 1000 \times 100 = 10^5 \text{ N} = 100 \text{ kN}$$

$$\text{Rotasi akibat prategang } \theta_p = \frac{PeL}{2EI} = \left(\frac{100 \times 50 \times 6 \times 10^3}{2 \times 36 \times 225 \times 10^6} \right) = 0,00185 \text{ radian}$$

$$\text{Berat sendiri balok, } g = 0,1 \times 0,3 \times 24 = 0,72 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban hidup } q = 4 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban total} = 4,72 \text{ kN/m}$$

$$w_d = 0,00472 \text{ kN/mm}$$

$$\text{Rotasi akibat beban } \theta_1 = \left(\frac{w_d L^3}{24EI} \right) = \left(\frac{0,00472 \times 6000^3}{24 \times 36 \times 225 \times 10^6} \right) = 0,00525 \text{ radian}$$

$$\text{Rotasi bersih} = (0,00525 - 0,00185) = 0,0034 \text{ radian}$$

$$\text{Perpanjangan kabel} = 2 \times 50 \times 0,0034 = 0,34$$

$$\text{Kenaikan tegangan akibat pembebanan} = \left[\frac{0,34 \times 210 \times 10^3}{6000} \right] = 12 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Tegangan awal pada kabel} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Persentase kenaikan tegangan} = \left(\frac{12 \times 100}{1000} \right) = 1,2\%$$

4.6.2 Variasi Tegangan Baja pada Batang Beton dengan Rekatan (Bonded) dan Tanpa Rekatan (Unbonded)

Tingkat kenaikan tegangan pada tendon batang beton prategang akibat beban tergantung pada derajat perekatan antara kawat baja bermutu tinggi dan beton, sekelilingnya. Dalam hal batang beton dengan rekatan (bonded) seperti elemen pratarik atau batang pascatarik yang di-grout, aksi gabungan antara baja dan beton berlaku dan tegangan-tegangan pada baja dihitung dengan memakai teori penampang komposit sampai dengan tahap retak. Dalam hal balok tanpa rekat (unbonded), tendon bebas memperpanjang diri sepenuhnya di bawah aksi beban transversal pada balok. Peningkatan tegangan pada baja tergantung pada regangan rata-rata pada beton pada elemen baja. Metode perhitungan peningkatan tegangan diuraikan dalam Bagian 4.6.2.1 dan 4.6.2.2 untuk kedua tipe batang.

4.6.2.1 Balok dengan Rekatan (Bonded Beams)

Kalau M = momen pada penampang akibat beban

E_s dan E_c = modulus elastisitas baja dan beton

α_e = rasio modulus

y = kedudukan baja terhadap sumbu pusat

f = tegangan pada beton pada ketinggian y dari sumbu pusat

I = momen inersia penampang beton

Tegangan pada baja = (rasio modulus) \times (tegangan pada beton)

$$= \alpha_e f$$

$$= \alpha_e (My/I)$$

4.6.2.2 Balok tanpa Rekatan (Unbonded Beams)

Kalau δL = perpanjangan total kabel pada jarak y dari sumbu pusat

L = panjang total kabel

M = momen lentur pada potongan melintang

Regangan pada beton pada ketinggian baja = $My/E_c I$

Perpanjangan total serat beton pada ketinggian baja

$$= \delta L = \int_0^L (My/E_c I) dx$$

$$\text{Regangan rata-rata} = \delta L/L = y/E_c I \int_0^L M dx$$

$$\text{Tegangan pada baja} = (E_s/E_c) (y/I) \int_0^L M dx$$

$$= (\alpha_e y/I) \int_0^L M dx$$

Kalau A = luas diagram momen lentur pada suatu sistem beban tertentu,

$$A = \int_0^L M dx$$

$$\text{Maka tegangan pada baja} = (\alpha_e y A/I L)$$

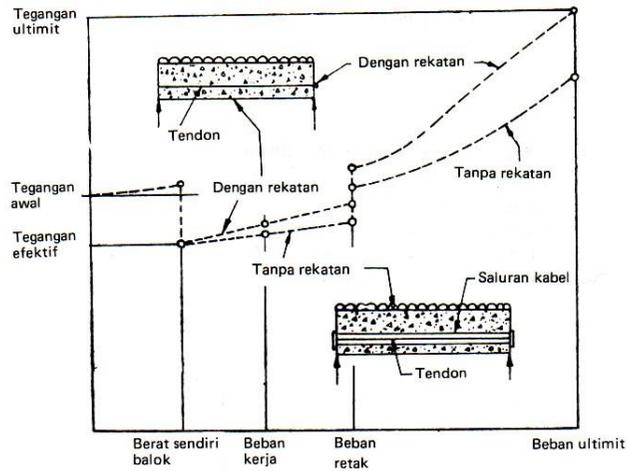
Kalau balok hanya memikul suatu beban terbagi rata sebesar w_d per satuan panjang,

$$\text{Maka } A = \int_0^L M dx = [(2/3)L_d w L^2 / 8] = [w_d L^3 / 12]$$

$$\text{Kenaikan tegangan pada baja} = [\alpha_e y w_d L^2 / 12 I]$$

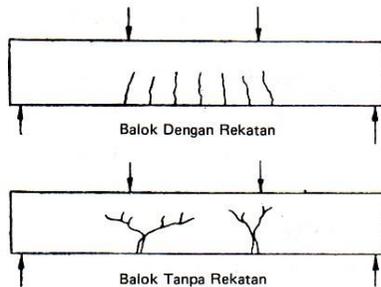
Variasi tegangan baja pada balok dengan rekatan dan tanpa rekatan dilukiskan dalam Gambar 4.18 untuk tahap-tahap pembebanan yang berlainan². Tingkat kenaikan tegangan dalam hal balok dengan rekatan adalah lebih besar dibandingkan dengan balok tanpa rekatan, baik dalam tahap sebelum retak maupun sesudah retak. Namun, setelah terjadinya retak, tegangan pada baja meningkat dengan laju yang lebih cepat pada kedua tipe balok. Oleh karena dalam hal balok tanpa rekatan baja tidak mencapai kekuatan ultimitnya, maka beban ultimit yang dipikul oleh balok itu lebih kecil daripada dalam hal balok dengan rekatan di mana baja mencapai kekuatan ultimitnya pada waktu patahnya batang.

Dalam tahap setelah terjadinya retak, sementara balok dengan rekatan ditandai dengan terjadinya retak-retak halus yang terbagi merata dalam daerah dengan momen lebih besar, balok tanpa rekatan hanya menimbulkan sedikit retak-retak yang terletak pada penampang yang lebih lemah dan lebar retaknya dengan demikian lebih besar dibanding-



Gambar 4.18 Variasi Tegangan pada Baja pada Balok Dengan Rekatan dan Tanpa Rekatan.

kan dengan yang terjadi pada balok dengan rekatan. Pola retakan³ pada kedua tipe balok tersebut dilukiskan dalam Gambar 4.19. Pada umumnya balok dengan rekatan lebih disukai karena kekuatannya lebih tinggi serta karakteristik deformasinya dapat diramalkan.



Gambar 4.19 Pola Retak yang Khas pada Balok dengan Rekatan dan Tanpa Rekatan.

CONTOH 4.13

Sebuah balok beton prategang dengan lebar 200 mm dan tinggi 300 mm memikul beban hidup sebesar 2,56 kN/m, sepanjang bentang efektif 10 m. Tendonya ditempatkan di dalam saluran yang ditempatkan dengan eksentrisitas 100 mm. Hitunglah naiknya tegangan baja akibat pembebanan apabila:

(a) saluran di-grout sedemikian rupa sehingga regangan pada baja dan beton yang berdekatan adalah sama; dan

(b) apabila saluran tersebut tidak di-grout sehingga tendon dapat bergerak di dalam saluran tanpa gesekan.

$$\begin{aligned} E_s &= 210 \text{ kN/mm}^2 \\ E_c &= 35 \text{ kN/mm}^2 \\ D_c &= 24 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

Berat sendiri balok, $g = (0,2 \times 0,3 \times 24) = 1,44 \text{ kN/m}$

Beban hidup pada balok, $q = 2,56 \text{ kN/m}$

Beban total pada balok, $w_d = 4,00 \text{ kN/m}$

Momen inersia, $I = (200 \times 300^3/12) = 45 \times 10^7 \text{ mm}^4$

rasio modulus $\alpha_e = (E_s/E_c) = \left(\frac{210}{35}\right) = 6$

Momen lentur pada tengah-tengah bentang $M = (0,125 \times 4 \times 10^2) = 50 \text{ kN/m}$

(a) Balok dengan rekatan

$$\text{Tegangan pada beton, } My/I = \left[\frac{(50 \times 10^6) 100}{45 \times 10^7}\right] = 11,1 \text{ N/mm}^2$$

Tegangan pada baja = (α_e) (Tegangan pada beton) = $(6)(11,1) = 66,6 \text{ N/mm}^2$

(b) Balok tanpa rekatan

$$\begin{aligned} \text{Tegangan pada baja} &= \left(\frac{\alpha_e y w_d L^2}{12I}\right) = \left[\frac{6 \times 100 \times 4 \times (10 \times 1000)^2}{12 \times 45 \times 10^7}\right] \\ &= 44,4 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

4.7 MOMEN RETAKAN

Momen lentur di mana retakan yang dapat dilihat timbul pada batang beton prategang umumnya disebut "momen retak". Setelah pemindahan prategang ke beton, sofit balok akan mengalami tekanan. Berangsur-angsur tegangan tekan ini diimbangi oleh tegangan tarik yang timbul akibat beban transversal pada balok, sehingga tegangan resultan pada serat paling bawah menjadi nol. Penambahan beban lebih lanjut akan mengakibatkan timbulnya tegangan tarik pada sofit balok. Karena beton lemah terhadap tarikan maka retak-retak mikro timbul begitu regangan tarik pada beton melampaui suatu nilai sekitar $80-100 \times 10^{-6}$ satuan⁴ dan kalau beban dinaikkan lagi, retak-retak yang dapat dilihat timbul dalam daerah tarik. Pada tahap ini diperkirakan bahwa lebar retakan berada dalam orde 0,01–0,02 mm.⁵

Tegangan tarik yang timbul apabila retak-retak menjadi terlihat pada sofit balok tergantung pada tipe serta distribusi tulangan baja dan kualitas beton dalam balok. Namun, umumnya dianggap bahwa retak-retak yang tampak muncul apabila tegangan tarik pada sofit kira-kira sama dengan modulus keruntuhan materialnya. Lebar retak-retak tersebut sangat dipengaruhi oleh tingkat rekatan yang terjadi antara beton dan baja. Contoh berikut melukiskan metode perhitungan momen retak serta faktor beban terhadap retakan.

CONTOH 4.14

Sebuah balok beton persegi panjang dengan potongan melintang yang lebarnya 120 mm serta tingginya 300 mm diberi prategang dengan suatu kabel lurus yang membawa gaya efektif sebesar 180 kN dengan eksentrisitas 50 mm. Balok tersebut memikul beban terpasang sebesar 3,14 kN/m sepanjang bentang 6 m. Kalau modulus keruntuhan beton sama dengan 5 N/mm^2 , dihitung faktor beban terhadap retakan dengan anggapan bahwa berat sendiri beton adalah 24 kN/m^3 .

$$\begin{aligned}
 P &= 180 \text{ kN} & I &= 27 \times 10^7 \text{ mm}^4 \\
 e &= 50 \text{ mm} & Z &= 18 \times 10^5 \text{ mm}^3 \\
 A &= 36 \times 10^3 \text{ mm}^2 & g &= (0,12 \times 0,3 \times 24) = 0,86 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Jadi beban total $w = (g + q) = (0,86 + 3,14) = 4 \text{ kN/m}$

Tegangan-tegangan akibat prategang

$$(P/A) = 5 \text{ N/mm}^2 \qquad (Pe/Z) = 5 \text{ N/mm}^2$$

Tegangan-tegangan akibat beban:

Momen kerja maksimum $= (0,125 \times 4 \times 6^2) = 18 \text{ kN.m}$

$$(M/Z) = [(18 \times 10^6)/(18 \times 10^5)] = 10 \text{ N/mm}^2$$

Tegangan pada serat paling bawah pada beban kerja $= (5 + 5 - 10) = 0 \text{ N/mm}^2$

Tegangan yang bersesuaian dengan retakan pada serat paling bawah $= 5 \text{ N/mm}^2$

Momen tambahan yang diperlukan untuk menimbulkan tegangan ini $= (5 \times 18 \times 10^5)$
 $= 9 \times 10^6 \text{ N/mm} = 9 \text{ kNm}$.

Jadi momen retakan $= (18 + 9) = 27 \text{ kN.m}$

$$\text{Faktor beban terhadap retakan} = \frac{\text{momen retak}}{\text{momen kerja}} = \frac{27}{18} = 1.5$$

