

TUGAS AKHIR

**PENGARUH LAMA PEMBEBANAN DAN
VARIASI TAMPANG TERHADAP LENDUTAN
PADA BALOK BETON PRATEGANG**



Oleh :

M. Herwin Multadory

No. Mhs : 92310234

NIRM : 920051013114120234

D. Fahmi El Husni

No. Mhs : 91310090

NIRM : 910051013114120086

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

1999

TUGAS AKHIR

**PENGARUH LAMA PEMBEBANAN DAN
VARIASI TAMPANG TERHADAP LENDUTAN
PADA BALOK BETON PRATEGANG**

**Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia
untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh
derajat Sarjana Teknik Sipil**

Oleh :

Mohammad Herwin Multadory

No. Mhs : 92310234

NIRM : 920051013114120234

Darul Fahmi El Husni

No. Mhs : 91310090

NIRM : 910051013114120086

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

1999

TUGAS AKHIR

**PENGARUH LAMA PEMBEBANAN DAN
VARIASI TAMPANG TERHADAP LENDUTAN
PADA BALOK BETON PRATEGANG**

Oleh :

Mohammad Herwin Multadory

No. Mhs : 92310234

NIRM : 920051013114120234

Darul Fahmi El Husni

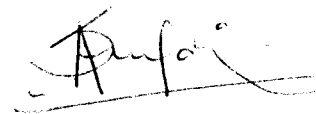
No. Mhs : 91310090

NIRM : 910051013114120086

Telah Diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. H. Much. Samsudin, MT

Dosen Pembimbing I



Tanggal : 1-9-99.

Ir. Ade Ilham, MT

Dosen Pembimbing II



Tanggal : 1-9-1999

PRAKATA



السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya yang telah diberikan, sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

Berdasarkan kurikulum yang berlaku, Tugas Akhir ini diselesaikan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk dapat memperoleh derajat sarjana jenjang strata satu (S-1) pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Pada kesempatan ini disampaikan banyak terima-kasih kepada semua pihak yang telah turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan Tugas Akhir ini, terutama kepada :

1. Bapak Ir. H. Muchammad Samsudin, MT, selaku Dosen Pembimbing I,
2. Bapak Ir. Ade Ilham, MT, selaku Dosen Pembimbing II,
3. Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
4. Rekan-rekan dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberi andil dalam menyusun Tugas Akhir ini.

Semoga segala bantuan dan saran yang telah diberika kepada kami dapat menjadi amal sholeh dan mendapat balasan dari Allah SWT. Disadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran yang bersifat

membangun sangat diharapkan untuk kesempurnaannya. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat yang baik bagi penyusun dan siapapun yang membacanya.

والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته

Yogyakarta, Agustus 1999

Penulis

Mohammad Herwin Multadory

Darul Fahmi El Husni

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| Lembar Judul | i |
| Lembar Pengesahan | ii |
| Prakata | iii |
| Daftar Isi | v |
| Daftar Notasi dan Simbol | ix |
| Daftar Tabel | xii |
| Daftar Gambar | xiii |
| Daftar Lampiran | xv |
| Abstraksi | xvi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Tujuan | 4 |
| 1.4 Manfaat | 5 |
| 1.5 Batasan Masalah | 5 |
| 1.6 Metodologi Penulisan..... | 6 |
| | |
| BAB II LANDASAN TEORI | 7 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka | 7 |
| 2.2 Konsep Dasar Bcton Prategang | 10 |
| 2.3 Sistem Prategang | 11 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.4 | Bahan-bahan Beton Prategang | 11 |
| 2.4.1 | Beton | 11 |
| 2.4.2 | Baja untuk Tendon | 12 |
| 2.4.3 | Pengankuran Ujung | 13 |
| 2.4.4 | Bahan Pelengkap | 14 |
| 2.5 | Perencanaan Bentuk Penampang | 15 |
| 2.5.1 | Tinjauan Umum | 15 |
| 2.5.2 | Bentuk dan Ukuran Penampang | 15 |
| 2.5.3 | Tinjauan Tegangan terhadap Gaya Prategang | 17 |
| 2.5.4 | Tata Letak Tendon | 22 |
| 2.5.5 | Kontrol Tegangan | 24 |
| 2.6 | Lendutan | 26 |
| 2.6.1 | Umum | 26 |
| 2.6.2 | Lendutan Jangka Pendek | 27 |
| 2.6.3 | Lendutan Jangka Panjang | 29 |
| 2.6.4 | Kehilangan Tegangan | 44 |
| 2.6.5 | Kontrol Lendutan | 52 |
| BAB III PERENCANAAN DAN ANALISIS | | 55 |
| 3.1 | Data Analisis | 55 |
| 3.2 | Tegangan Ijin | 56 |
| 3.3 | Perencanaan Tampang Balok | 56 |
| 3.3.1 | Perhitungan Momen Lentur | 57 |
| 3.3.2 | Perhitungan Modulus Tampang Rencana..... | 57 |

| | |
|---|----|
| 3.3.3 Perhitungan Dimensi Penampang | 58 |
| 3.4 Perhitungan Propertis Penampang | 59 |
| 3.5 Perhitungan Gaya Prategang | 61 |
| 3.6 Eksentrisitas Tendon | 62 |
| 3.7 Kontrol Luas Penampang | 63 |
| 3.8 Perhitungan Tendon | 63 |
| 3.9 Perhitungan Sifat Penampang | 64 |
| 3.9.1 Saat Transfer | 64 |
| 3.9.2 Saat Layan | 66 |
| 3.10 Kontrol Eksentrisitas Penampang | 67 |
| 3.11 Perhitungan Koefisien Rangkak | 68 |
| 3.12 Kehilangan Tegangan tendon..... | 69 |
| 3.12.1 Akibat Pengangkuran | 69 |
| 3.12.2 Akibat Deformasi Elastis Beton | 70 |
| 3.12.3 Akibat Gesekan | 70 |
| 3.12.4 Akibat Rangkak Beton | 71 |
| 3.12.5 Akibat Susut Beton | 71 |
| 3.12.6 Akibat Relaksasi Baja | 71 |
| 3.13 Kontrol Tegangan | 72 |
| 3.14 Analisa Lendutan | 74 |
| 3.15 Kontrol Lendutan | 77 |
| BAB IV PEMBAHASAN | 82 |
| 4.1 Umum | 82 |

| | |
|---|----|
| 4.2 Tegangan Tendon Efektif | 85 |
| 4.3 Prosentase Kehilangan Tegangan Tendon | 86 |
| 4.4 Tegangan Beton | 88 |
| 4.5 Faktor Koreksi Rangkak Beton | 91 |
| 4.6 Besar Lendutan | 92 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 94 |
| 5.1 Kesimpulan | 94 |
| 5.2 Saran | 95 |
| DAFTAR PUSTAKA | 96 |
| LAMPIRAN | |

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

| | | |
|--------------|---|--|
| A_c | : | Luas penampang balok beton |
| A_{netto} | : | Luas penampang netto balok |
| $A_{trans.}$ | : | Luas penampang transformasi balok |
| A_{ps} | : | Luas baja prategang |
| h | : | Lebar penampang balok |
| B | : | Jarak antar balok |
| $c.g.c$ | : | Pusat berat balok beton |
| $c.g.s$ | : | Pusat berat luas baja |
| C_b | : | Jarak dari serat bawah ke pusat berat balok beton |
| C^t | : | Jarak dari serat atas ke pusat berat balok beton |
| C_i | : | Faktor koreksi rangkai beton pada saat t |
| C_u | : | Faktor koreksi rangkai ultimate beton |
| d | : | Jarak serat tekan terluar terhadap titik berat dari baja |
| e | : | Jarak eksentrisitas tendon. |
| e_c | : | Eksentrisitas tendon pada tengah bentang. |
| E_c | : | Modulus elastisitas beton. |
| E_{ci} | : | Modulus elastisitas beton pada saat transfer. |
| E_{ps} | : | Modulus elastisitas baja prategang. |
| f_c | : | Kuat tekan beton. |
| f_{ci} | : | Kuat tekan beton pada saat transfer. |
| f_{cs} | : | Kuat tekan beton pada saat layan. |

- f_{ti} : Kuat tarik beton pada saat transfer.
- f_{ts} : Kuat tarik beton pada saat layan.
- f_{pi} : Tegangan akibat gaya prategang awal.
- f_{pe} : Tegangan akibat gaya efektif tendon (setelah memperhitungkan semua kehilangan tegangan).
- h : Tinggi penampang balok beton.
- H : Kelembaban relatif udara dalam beton.
- I_c : Momen inersia balok beton.
- I_{netto} : Momen inersia netto balok beton.
- I_{transf} : Momen inersia transformasi balok beton.
- K_{SH} : Faktor koreksi kehilangan tegangan untuk elemen pasca tarik.
- k' : Jarak kern atas dari pusat berat balok beton.
- k_b : Jarak kern bawah dari pusat berat balok beton.
- L : Panjang bentangan balok.
- M : Momen
- M_D : Momen akibat berat sendiri balok
- M_{SD} : Momen akibat beban mati.
- M_L : Momen akibat beban hidup.
- n : Rasio modulus elastisitas.
- P : Gaya prategang.
- P_I : Gaya prategang awal.
- P_e : Gaya prategang efektif.
- r : Jari-jari putar balok.

- S : Modulus penampang balok.
- S_b : Modulus penampang serat bawah balok.
- S' : Modulus penampang serat atas balok.
- t : Waktu.
- β_s : Faktor koreksi rangkai akibat pengaruh umur pembebanan.
- Δf_p : Kehilangan gaya prategang.
- ΔP : Total kehilangan tegangan ultimate dikurangi kehilangan tegangan akibat deformasi elastisitas beton.
- δ : Lendutan atau anti lendutan.
- δ_D : Lendutan akibat berat sendiri balok.
- δ_{SD} : Lendutan akibat beban mati.
- δ_L : Lendutan akibat beban hidup.
- ε : Regangan beton.
- $(\varepsilon_{SH})_t$: Regangan susut beton pada waktu t
- $(\varepsilon_{SH})_u$: Regangan susut ultimate beton.
- σ : Tegangan beton.
- γ : Berat volume beton.

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|---|----|
| Tabel 2.1 | Faktor yang mempengaruhi rangkai pada beton dalam kondisi standar | 38 |
| Tabel 2.2 | Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon <i>post tensioned</i> | 46 |
| Tabel 2.3 | Nilai K_{SH} untuk elemen <i>post tensioned</i> | 50 |
| Tabel 2.4 | Angka perbandingan bentang (L) dengan defleksi (δ) maksimum yang diijinkan | 53 |
| Tabel 3.1 | Hasil analisa lendutan umur 5 tahun balok tampang persegi panjang | 77 |
| Tabel 3.2 | Hasil analisa lendutan umur 5 tahun balok tampang T tunggal | 78 |
| Tabel 3.3 | Hasil analisa lendutan umur 5 tahun balok tampang I simetris | 79 |
| Tabel 3.4 | Hasil analisa lendutan terhadap variasi lama pembebanan balok tampang persegi panjang | 80 |
| Tabel 3.5 | Hasil analisa lendutan terhadap variasi lama pembebanan balok tampang T tunggal | 80 |
| Tabel 3.6 | Hasil analisa lendutan terhadap variasi lama pembebanan balok tampang I simetris | 81 |
| Tabel. 4.1 | Hasil analisa balok tampang persegi panjang | 84 |
| Tabel. 4.2 | Hasil analisa balok tampang T tunggal | 84 |
| Tabel. 4.3 | Hasil analisa balok tampang I simetris..... | 85 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Prinsip pengankuran pada sistem <i>post tensioned</i> | 14 |
| Gambar 2.2 | Bentuk-bentuk penampang | 16 |
| Gambar 2.3 | Distribusi tegangan sepanjang penampang balok beton prategang sentris | 18 |
| Gambar 2.4 | Distribusi tegangan sepanjang penampang balok beton prategang eksentris | 19 |
| Gambar 2.5 | Pengaruh gaya prategang | 20 |
| Gambar 2.6 | Rentang batas letak tendon | 24 |
| Gambar 2.7 | Diagram momen P_i dengan tendon sentris | 28 |
| Gambar 2.8 | Tendon eksentris | 28 |
| Gambar 2.9 | Hubungan antara tegangan (σ) dan waktu (t) pada definisi rangkai | 31 |
| Gambar 2.10 | Hubungan regangan (ϵ) akibat fungsi waktu (t) | 32 |
| Gambar 2.11 | Kurva hubungan antara deformasi dengan waktu pembebanan | 33 |
| Gambar 2.12 | Pengaruh faktor air semen terhadap rangkai pada struktur beton | 36 |
| Gambar 2.13 | Perpendekan elastis beton | 44 |
| Gambar 2.14 | Pendekatan sudut pusat tendon | 47 |
| Gambar 2.15 | Kurva kehilangan tegangan terhadap waktu untuk kawat <i>stress</i> | |

| | | |
|------------|---|----|
| | <i>relieved</i> pada 70 % dan dijaga pada panjang konstan dengan suhu 85° F | 50 |
| Gambar 3.1 | Bentangan balok bentuk persegi panjang | 56 |
| Gambar 3.2 | Dimensi tampang balok bentuk persegi panjang | 59 |
| Gambar 3.3 | Lintasan tendon dan bentuk penampang yang dianalisa | 64 |
| Gambar 4.1 | Tegangan efektif tendon terhadap lama pembebanan | 85 |
| Gambar 4.2 | Prosentase kehilangan tegangan terhadap lama pembebanan ... | 87 |
| Gambar 4.3 | Tegangan beton serat atas terhadap lama pembebanan | 89 |
| Gambar 4.4 | Tegangan beton serat bawah terhadap lama pembebanan | 90 |
| Gambar 4.5 | Faktor koreksi rangkai terhadap lama pembebanan | 92 |
| Gambar 4.6 | Besar lendutan terhadap lama pembebanan | 93 |

DAFTAR LAMPIRAN

- | | |
|------------|--|
| Lampiran 1 | Perhitungan desain dan analisis dengan program komputer (Microsoft Excel) |
| Lampiran 2 | Data-data kabel dan angkur tendon |

ABSTRAKSI

Dalam setiap perencanaan struktur terjadinya lendutan merupakan suatu hal yang tidak dapat dihindarkan. Hal tersebut menuntut para perancang struktur untuk mengevaluasi lendutan yang terjadi secara seksama. Karena besarnya lendutan akan mempengaruhi pada fungsi atau kegunaan struktur. Penulisan Tugas Akhir ini bertujuan untuk membandingkan lendutan yang terjadi pada beberapa bentuk penampang balok struktur gedung dan terhadap variasi waktu lama pembebanan. Bentuk-bentuk penampang balok yang dianalisa berupa penampang bentuk persegi panjang, T tunggal, dan I simetris yang mempunyai tinggi penampang yang sama dan menerima beban-beban luar yang sama. Tugas Akhir ini menguraikan faktor-faktor yang berkaitan erat dengan peristiwa lendutan yang terjadi pada balok beton prategang dan penyajian rumus-rumus yang mendukungnya. Untuk selanjutnya diberikan contoh kasus struktur balok beton prategang untuk gedung dan penyelesaian perhitungan dipercepat dengan menggunakan alat bantu program komputer (Microsoft Excel)

Lendutan sesaat pada balok beton prategang dipengaruhi adanya gaya prategang yang diberikan pada beton, sehingga terjadi camber yang akan mereduksi lendutan akibat berat sendiri balok dan gaya-gaya luar yang bekerja kepadanya, sedangkan lendutan jangka panjangnya dipengaruhi oleh rangkai pada beton.

Hasil analisis menunjukkan bahwa lendutan yang terjadi pada balok struktur semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu. Prosentase peningkatan yang besar pada 1 tahun setelah pemberian beban-beban luar kemudian pada tahun-tahun berikutnya prosentase peningkatan tersebut semakin berkurang. Balok dengan bentuk penampang T tunggal mempunyai prosentase peningkatan sebesar 17.44% dan merupakan yang paling kecil di antara balok balok tampang lainnya. Sedangkan balok tampang persegi panjang yang paling besar karena prosentase peningkatannya sebesar 26.25% lebih besar dibandingkan balok tampang I simetris yang mempunyai prosentase peningkatannya 23%.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pada dewasa ini pemakaian jenis struktur baik teknologi maupun bahannya terus meningkat, mulai dari kayu, baja struktural, beton bertulang dan akhirnya berkembang menjadi beton prategang. Pemakaian beton prategang telah mencakup semua jenis struktur bangunan, mulai dari gedung, jembatan hingga konstruksi bendungan. Struktur beton prategang pada kondisi-kondisi tertentu menjadi alternatif yang menguntungkan dibanding jenis struktur beton bertulang biasa.

Perbedaan utama antara beton bertulang biasa atau konvensional dengan beton prategang adalah beton bertulang biasa atau konvensional mengkombinasikan antara beton dan tulangan baja dengan cara menyatukan dan membiarkan keduanya bekerja bersama-sama sesuai dengan perencanaan yang ada, sedangkan beton prategang mengkombinasikan beton dan baja dengan cara aktif. Beton prategang dicapai dengan cara menarik baja dan menahannya ke beton, jadi membuat beton dalam keadaan tertekan. Kombinasi ini menghasilkan perilaku yang lebih baik dari kedua bahan tersebut.

Dalam perancangan suatu struktur harus diperhatikan hal-hal sebagai berikut ini.

1. Dari segi kekuatan, struktur tersebut dapat diandalkan kekuatannya.
2. Dari segi arsitektur, struktur tersebut memenuhi syarat-syarat keindahan.
3. Dari segi finansial, dalam arti biayanya tidak mahal.
4. Struktur tersebut mudah untuk dikerjakan.

Selain itu para perancang struktur harus menjamin bahwa :

1. di bawah pembebanan terburuk konstruksi tetap aman.
2. selama bekerja kerja normal, lendutan dari bagian-bagian konstruksi tidak mengurangi bentuk, keawetan dan daya kerja dari suatu konstruksi, dengan kata lain bahwa struktur harus tidak runtuh dan apabila terjadi lendutan tidak membahayakan pemakainya.

Dalam kenyataannya jarang sekali ditemui suatu konstruksi runtuh, kecuali apabila terjadi bencana alam. Tetapi yang sering terjadi di lapangan adalah terjadinya lendutan yang melampaui batas yang diperbolehkan. Terjadinya lendutan ini banyak dijumpai dalam praktek. Beberapa kasus dapat saja terjadi, misalnya rusaknya partisi atau eternit akibat lendutan pelat lantai yang terlampau besar, juga pecahnya kaca akibat hal yang sama.

Pada balok beton prategang, lendutan tergantung dari kombinasi antara gaya prategang dan beban luar juga tergantung lamanya pembebanan. Gaya prategang akan menimbulkan anti lendutan (*camber*), sedangkan beban luar akan menyebabkan lendutan. Secara umum lendutan dibedakan atas dua bagian, yaitu :

1. lendutan jangka pendek, yang terjadi segera setelah beban bekerja.
2. lendutan jangka panjang, yang terjadi sesudah perkembangan waktu.

Pada balok prategang, besarnya lendutan jangka panjang banyak ditentukan oleh parameter-parameter yang tergantung pada waktu, yaitu rangkak (*creep*) dan susut (*shrinkage*) pada beton kemudian relaksasi (*relaxation*) pada baja prategang.

Dengan memperhatikan hal-hal tersebut, maka beton prategang merupakan satu alternatif yang menarik untuk dikaji tentang lendutannya sehingga memberikan hasil yang bermanfaat.

1.2 Rumusan Masalah

Untuk melakukan analisis maupun desain suatu struktur perlu ditetapkan kriteria yang dapat digunakan sebagai ukuran untuk menentukan apakah struktur tersebut dapat diterima sesuai dengan yang diinginkan. Kemampulayanan dari suatu struktur antara lain berhubungan dengan masalah lendutan, terlebih lendutan untuk jangka waktu yang lama sesuai dengan umur rencana struktur itu sendiri.

Lendutan pada balok prategang berbeda dengan lendutan pada balok biasa. Pada lendutan balok bertulang biasa hanya dipengaruhi oleh beban yang bekerja padanya selain faktor susut dan rangkak pada lendutan jangka panjangnya. Pada balok beton prategang lendutan yang terjadi selain dipengaruhi oleh beban yang bekerja, juga dipengaruhi oleh gaya prategang serta faktor susut dan rangkak.

Sebelum retak, lendutan dari balok prategang dapat diramalkan dengan ketelitian yang lebih besar daripada balok beton bertulang. Pada beban kerja, balok beton prategang tidak akan retak jika prinsip beton prategang menggunakan pendekatan sebagai benda yang elastis. Dengan demikian lendutan dapat dihitung dengan metode-metode yang tersedia dalam dasar-dasar kekuatan bahan.

Faktor-faktor yang tergantung pada waktu dapat memperbesar lendutan, seiring dengan bertambahnya waktu, sehingga dalam mendesain suatu struktur harus dievaluasi lendutan jangka pendek (*short-term*), maupun lendutan jangka panjang (*long-term*) agar lendutan ini terjamin dan tidak akan melebihi batas tertentu yang diijinkan. Faktor-faktor yang tergantung waktu ini disebabkan oleh rangkai (*creep*) dan susut (*shrinkage*) pada beton, dan relaksasi (*relaxation*) dari baja.

Berdasarkan masalah tersebut, beberapa hal akan dijadikan rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini. Rumusan masalah tersebut adalah sebagai berikut ini.

1. Faktor-faktor yang mempengaruhi lendutan pada balok prategang.
2. Bagaimana parameter-parameter yang tergantung waktu tersebut dalam menyumbangkan lendutan jangka panjang.
3. Bagaimana menganalisa lendutan pada beberapa bentuk penampang balok beton prategang.

1.3 Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut ini.

1. Mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi lendutan pada balok beton prategang.
2. Mengetahui bagaimana menganalisa lendutan penampang balok beton prategang.

3. Mengetahui besar lendutan yang terjadi pada penampang balok beton prategang yang diteliti.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah menambah dan mengembangkan pengetahuan menganalisa lendutan akibat pengaruh lamanya pembebanan dari variasi bentuk penampang balok beton prategang.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan dan mempermudah permasalahan maka dalam Tugas Akhir ini dibatasi sebagai berikut ini.

1. Desain beton prategang ditinjau pada kondisi pasca tarik (*post tensioned*) dengan bentuk tendon yang melengkung serta diberi rekatan.
2. Perhitungan dilakukan dengan tumpuan sederhana (*simple beam*) yang menerima beban merata.
3. Balok prategang dianggap tidak retak baik saat transfer maupun saat layan sehingga perilakunya elastik.
4. Panjang bentang yang digunakan sepanjang 20 m.
5. Analisis dilakukan pada penampang persegi panjang, T tunggal, dan I simetris yang mempunyai tinggi penampang yang sama.
6. Variabel waktu yang digunakan untuk meninjau perhitungan lendutan pada akhir 5 tahun.
7. Data yang digunakan untuk bahan perencanaan sebagai berikut ini.

- a. Baja prategang : $f_{pu} = 1860$ Mpa
 - b. Mutu beton : $f'_c = 45$ Mpa
 - c. Berat volume beton : $\gamma' = 2.5$ t/m³
 - d. Beban mati : $w_{SD} = 0.5$ t/m²
 - e. Beban hidup : $w_L = 0.4$ t/m²
 - f. Kelembaban relatif : $RH = 60$ %
8. Perhitungan pembebanan memakai Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung (1983), sedangkan karakter dan tegangan ijin untuk balok beton dan baja prategang berdasarkan SK-SNI-T-15-1991 dan ACI Building Code 1995.

1.6 Metodologi Penulisan

Tugas Akhir ini merupakan studi literatur mengenai lendutan pada balok beton prategang. Tahapan-tahapan studi literatur ini dapat diuraikan secara singkat sebagai berikut ini.

1. Mencari dan membaca bahan-bahan literatur yang dibutuhkan dari perpustakaan, kemudian membahasnya.
2. Melakukan perhitungan untuk merencanakan dan menganalisis dimensi balok dengan memakai cara atau rumus yang ada di literatur.
3. Membuat program komputer untuk mempercepat perhitungan.
4. Membuat tabel dan grafik dari hasil perhitungan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Istimawan (1994) mendefinisikan struktur beton prategang sebagai suatu sistem struktur beton khusus dengan cara memberikan tegangan awal tertentu pada komponen sebelum digunakan untuk mendukung beban luar sesuai dengan yang diinginkan. Tujuan memberikan tegangan awal tekan beton pada lokasi dimana nantinya akan timbul tegangan tarik pada waktu komponen mendukung beban sedemikian rupa sehingga diharapkan sewaktu beban seluruhnya bekerja tegangan tarik total berkurang atau lenyap sama sekali.

Menurut Lin & Burns (1993) bahwa apa yang disebut sistem beton prategang sesungguhnya adalah cara menegangkan atau menarik baja yang dikombinasikan dengan cara mengangkurnya ke beton, termasuk barangkali beberapa rincian lain mengenai operasi/cara kerjanya.

Lin & Burns (1993) juga menyatakan bahwa salah satu pertimbangan istimewa pada beton prategang adalah banyaknya tahapan pembebanan dimana sebuah komponen struktur dibebani. Beberapa dari tahapan pembebanan ini terjadi juga pada struktur yang bukan prategang, tetapi yang lainnya terjadi hanya akibat prategang. Untuk struktur yang dicor setempat, beton prategang harus

didesain paling sedikit dua tahap, tahap awal pada saat pemberian gaya prategang dan tahap akhir pada saat dibebani beban eksternal. Untuk beton pracetak, tahap ketiga yaitu pengangkatan dan pengangkutan harus diteliti.

Naaman (1982) memberikan definisi lendutan sebagai perubahan posisi suatu titik dari batang sebelum bekerjanya beban sampai beban itu bekerja. Pada beton bertulang, lendutan diakibatkan oleh beban dan merupakan lendutan ke bawah sedangkan pada beton prategang, lendutan tergantung pada kombinasi pengaruh dari gaya prategang dan beban luar. Hal yang demikian ini akan lebih mudah dikontrol dengan merubah tampang dan besarnya gaya prategang. Pada balok bertulang dan beton prategang, lendutan di bawah pembebanan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu terutama pengaruh rangkak dan susut pada beton dan relaksasi dari baja prategang. Lendutan yang berlebihan terutama yang bertambah dengan waktu secara bersamaan, menyebabkan kesulitan dan harus dibatasi.

Menurut Lin dan Burns (1993) bahwa seperti biasa pada tiap komponen beton, dua kesulitan yang masih ditemukan jika kita ingin mendapatkan ramalan lendutan yang lebih teliti. Pertama, sulit menentukan nilai E_c dengan ketelitian 10% atau malahan dengan 20%. Percobaan-percobaan mengenai beton silinder contoh mungkin tidak memberikan nilai E_c yang tepat. Karena nilai E_c untuk balok dapat berbeda dari yang untuk silinder. Disamping itu, nilai E_c yang berubah-ubah untuk tegangan yang berbeda dan berubah menurut usia beton. Kesukaran yang kedua terletak dalam memperkirakan akibat rangkak pada

lendutan. Nilai dari koefisien rangkai, seperti besar dan lamanya beban yang berkerja, tidak dapat diperkirakan terlebih dahulu.

Menurut Wang & Salmon (1986) bahwa rangkai dan susut adalah deformasi tergantung dari waktu, yang retak menimbulkan kerisauan yang terbesar bagi perencana disebabkan kekurang tepatan dan kurangnya pengetahuan tentang rangkai dan susut. Beton bersifat elastis hanya di bawah pembebanan yang singkat, dan karena penambahan deformasi sesuai dengan waktu maka sifat dari beton adalah sama dengan sifat bahan yang tidak elastis. Oleh karenanya lendutan setelah jangka panjang yang lama menjadi sangat sulit diperkirakan, sekalipun pengendaliannya adalah diperlukan untuk menjamin kelayakan dari struktur selama umur layanannya.

Wang & Salmon (1986) juga menyatakan bahwa rangkai adalah satu sifat dari beton dimana beton mengalami deformasi yang terus menerus menurut waktu di bawah beban yang dipikul pada suatu satuan tegangan dalam batas elastis yang diperbolehkan. Deformasi yang tidak elastis ini bertambah dengan tingkat perubahan yang berkurang selama pembebanan, dan jumlah totalnya dapat mencapai besar berapa kali dari deformasi elastis dalam jangka waktu pendek. Seringkali rangkai ini dihubungkan dengan susut, karena keduanya terjadi bersamaan dan kerap kali memberikan pengaruh yang sama yaitu deformasi yang bertambah sesuai dengan waktu.

Libby (1987) memberikan definisi relaksasi sebagai kehilangan tegangan suatu material yang dikenai tegangan konstan. Walaupun tidak mengalami

regangan konstan, hal ini umumnya disesuaikan pada kondisi yang lebih mendekati regangan yang konstan.

2.2 Konsep Dasar Beton Prategang

Lin dan Burns (1993) mengemukakan, ada tiga konsep yang berbeda-beda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Hal ini penting bagi seorang perancang untuk mengerti ketiga konsep tersebut supaya dapat mendesain beton prategang seefisien mungkin. Ketiga konsep tersebut dapat diuraikan sebagai berikut ini.

1. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis

Konsep ini dikemukakan oleh Eugene Freyssinet dalam Lin dan Burns (1993), bahwa beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis. Hal ini dikarenakan beton tidak mengalami retak di bagian tarik balok walaupun terjadi tarikan. Atas dasar pandangan ini, beton dianggap sebagai benda yang mengalami dua sistem pembebanan, yaitu : gaya internal prategang dan beban eksternal, dengan tegangan tarik akibat gaya eksternal dilawan oleh tegangan tekan akibat gaya prategang (tendon).

2. Sistem Prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton.

Seperti halnya pada beton bertulang, konsep ini mempertimbangkan juga kombinasi dari baja dan beton, yaitu baja menahan tarik dan beton menahan gaya desak, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel gaya untuk melawan momen eksternal. Kelebihan beton prategang merupakan modifikasi pemakaian beton bertulang dengan memakai baja berkekuatan tinggi.

3. Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban.

Konsep ini menganggap beton sebagai benda bebas (*freebody*) dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya yang bekerja merata pada beton sepanjang bentangan, sehingga diperoleh gaya-gaya yang bekerja menjadi seimbang.

2.3 Sistem Prategang

Metode pelaksanaan prategang pada tendon menurut Winarni (1987), dilakukan dua cara yang sering digunakan, yaitu pratarik (*pretensioned*) yang dimaksudkan untuk menggambarkan metode sistem prategang karena tendon-tendon ditarik sebelum beton dicor. Alternatif dari sistem pratarik adalah pasca tarik (*posttensioned*), dalam metode ini tendon ditarik setelah beton mengeras.

2.4 Bahan-bahan Beton Prategang

2.4.1 Beton

Menurut Lin dan Burns (1993), beton yang digunakan untuk metode prategang harus memenuhi kriteria sebagai berikut ini.

1. Persyaratan Kekuatan Beton

Dalam perencanaan di lapangan, beton yang lebih kuat biasanya dibutuhkan untuk pekerjaan beton prategang daripada untuk beton konvensional. Beton untuk prategang umumnya digunakan yang mempunyai kekuatan tekan berkisar antara 24 hingga 55 Mpa untuk sampel beton silinder yang berumur 28 hari. Sedangkan untuk sampel beton kubus diambil 1.25 kali kekuatan sampel beton silinder.

2. Karakteristik Regangan Beton

Pada beton prategang, regangan-regangan beton sangat penting untuk diketahui. Karena hal ini untuk memperkirakan kehilangan gaya prategang pada baja dan untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh lain dari pemendekan pada beton, seperti : regangan elastis, rangkai, dan susut.

2.4.2 Baja untuk Tendon

Baja mutu tinggi adalah bahan yang harus dipakai agar menghasilkan gaya prategang dan mensuplai gaya tarik pada beton. Cara pembuatan baja mutu tinggi dapat dikerjakan dengan pencampuran (*alloying*) baja dengan karbon. Semakin tinggi kadar karbon semakin kuat dan keras baja yang dihasilkan tetapi semakin kurang liat. Cara lain untuk memperbaiki sifat baja tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain : pengerjaan panas (*flame hardening*) dan pengerjaan dingin (*cold work*). Pengerjaan panas dilakukan dengan cara memanasi permukaan baja sampai di atas suhu rekristalisasi kemudian didinginkan secara mendadak dengan cara dicelupkan ke dalam air atau minyak. Pengerjaan dingin dikerjakan dengan cara penggilasan permukaan baja oleh roda baja yang keras.

Pemakaian baja mutu tinggi untuk tendon dipilih di antara tiga jenis, yaitu kawat (*wire*), untaian kawat (*strand*), dan batang (*bar*). Tendon jenis kawat di lapangan terdapat dua bentuk, yaitu : bentuk polos dan berulir yang disuplai dalam bentuk gulungan panjang. Karena itu tendon kawat cocok digunakan untuk beton pratarik yang memerlukan rekatan langsung dengan beton. Keuntungan lainnya, karena kawat tendon sangat panjang sehingga dapat digunakan untuk membuat

beberapa balok beton prategang dalam satu kali tarikan. Meskipun demikian tendon kawat dapat pula digunakan untuk beton pascatarik tetapi dirasakan tidak efektif dibandingkan dengan tendon jenis untaian kawat (*strand*).

Strand dibuat di pabrik dengan memintir beberapa kawat bersama-sama sehingga dapat mengurangi jumlah satuan yang harus dikerjakan pada saat operasi penarikan tendon. Tendon jenis ini mempunyai kuat batas yang tinggi di atas 1700 MPa tergantung jumlah kawatnya. *Strand* dengan tujuh kawat sering digunakan dalam beton prategang baik untuk *pretensioned* maupun *post tensioned*, meskipun harganya lebih mahal dari pada kumpulan kawat dengan kekuatan tarik yang sama. Tendon tujuh kawat mempunyai karakteristik rekatan dengan tendon yang lebih baik dan hemat dalam penarikannya.

Pemakaian tendon batang di lapangan terdapat dalam bentuk polos dan ulir. Pemakaian dalam beton prategang terbatas pada balok yang bentangnya pendek. Diameter tendon batang dimulai 25.4 mm sampai 34.9 mm dengan kekuatan tegangan tarik berkisar 1000 MPa sampai 1600 MPa.

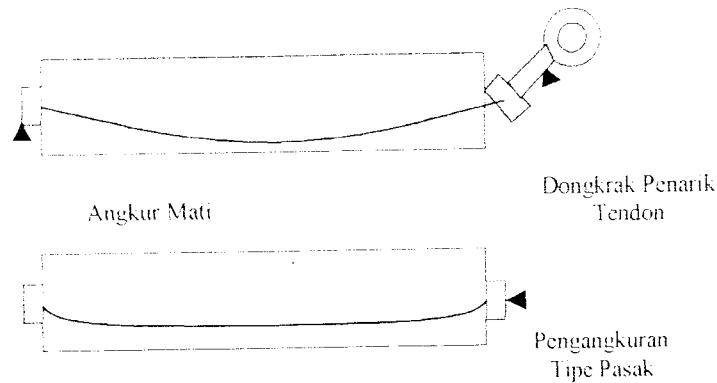
2.4.3 Pengangkuran Ujung

Prinsip pengangkuran ujung tendon balok beton dengan sistem *post tensioned* ada dua metode, yaitu :

1. dengan prinsip kerja pasak yang menghasilkan penjepit geser pada kabel,
2. dengan perletakan langsung dari paku keling atau baut yang dipasang pada ujung kabel.

Kedua metode ini dibuat secara sistematis. Setelah beton mengeras, mula-mula tendon-tendon diselipkan melalui selubung kemudian di salah satu ujung tendon dibuat pengangkuran perletakan langsung dari kepala paku keling atau

baut. Setelah angkur dibuat, lalu dioperasikan penarikan kemudian gaya prategang ditambahkan pada angkur jenis pengankuran pasak yang menahan gesekan tendon. Gambar 2.1 berikut ini menggambarkan metode pengankuran tendon.



Gambar 2.1. Prinsip pengankuran pada sistem *post tensioned*

2.4.4 Bahan Pelengkap

Di antara bahan pelengkap yang dibutuhkan untuk beton prategang antara lain adalah bahan pengisi (*grouting*) untuk selubung tendon (*sheath*). Untuk sistem pratarik tidak ada selubung yang diperlukan. Untuk sistem pasca tarik, ada dua macam selubung (*sheath*), yaitu untuk sistem prategang dengan rekatan (*bonded*), dan yang untuk tanpa rekatan (*unbonded*).

Jika tendon diberi rekatan, umumnya dengan *grouting* melalui selubungnya, biasanya dipakai semen biasa atau semen yang mempunyai kemampuan tinggi dicampur dengan air. Sedangkan untuk tendon tanpa rekatan, biasanya dipakai plastik atau kertas tebal sebagai pembungkus dan tendon diberi minyak (*grease*) untuk mempermudah penarikan dan untuk mencegah karat.

2.5 Perencanaan Bentuk Penampang

2.5.1 Tinjauan Umum

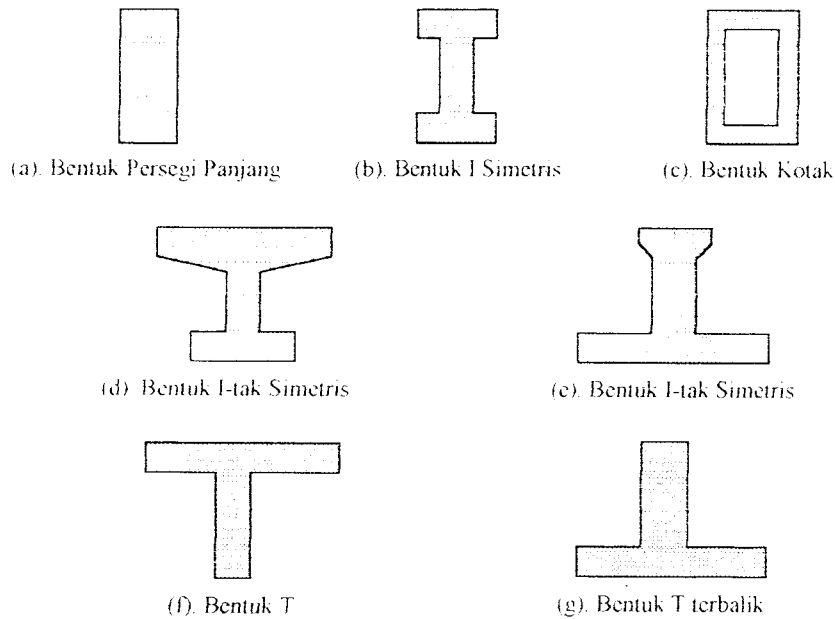
Proses perhitungan perencanaan balok beton prategang terdiri dari beberapa langkah. Pertama kali dilakukan pemilihan bentuk dan ukuran penampang, kemudian peninjauan besar gaya prategang dan eksentrisitas tendon untuk penampang dengan beban atau momen yang terjadi dan berikutnya penentuan tata letak (*lay-out*) tendon sepanjang balok. Kemudian berdasarkan pada hasil penetapan tersebut dilakukan pemeriksaan, terutama terhadap tegangan yang terjadi.

2.5.2 Bentuk dan Ukuran Penampang

Bentuk-bentuk penampang yang seringkali digunakan untuk beton prategang, antara lain sebagai berikut ini.

1. Penampang I simetris
2. Penampang I tak simetris
3. Penampang T
4. Penampang T terbalik
5. Penampang kotak (*box*)
6. Penampang persegi panjang.

Bentuk-bentuk penampang dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini



Gambar 2.2. Bentuk-bentuk penampang

Dalam praktek, tinggi penampang h biasanya sudah ditentukan, diketahui, atau diasumsikan. Suatu aturan aproksimasi adalah menggunakan 70 % penampang balok beton bertulang konvensional. Cara empiris lainnya juga ada. Umpamanya, tebal pelat beton prategang bervariasi antara $L/35$ untuk beban berat dan $L/55$ untuk beban ringan, dalam Lin dan Burns (1993). Winarni (1987) memberikan persamaan untuk pendekatan besarnya tinggi balok, sebagai berikut :

$$h = k \cdot \sqrt{M} \quad (2.1)$$

dengan M : momen maksimum yang terjadi dalam t.m

$$k : 10 - 15$$

Nilai-nilai modulus tampang dengan memperhitungkan kehilangan tegangan, digunakan untuk memilih dan menentukan penampang yang memenuhi syarat-syarat modulus tampang yang diperlukan baik terhadap sisi atas dan bawah adalah sebagai berikut ini.

$$S^t \geq \frac{(1 - R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{R \cdot f_n - f_{cs}} \quad (2.2.a)$$

dan

$$S_b \geq \frac{(1 - R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{f_n - R \cdot f_{cs}} \quad (2.2.b)$$

dengan

R : rasio kehilangan gaya prategang

M_D : momen yang terjadi akibat berat sendiri balok dalam kN.m

M_{SD} : momen yang terjadi akibat beban mati dalam kN

M_L : momen yang terjadi akibat beban hidup dalam kN

S_b : modulus tampang terhadap sisi bawah dalam m

S^t : modulus tampang terhadap sisi atas dalam m

2.5.3 Tinjauan Tegangan terhadap Gaya Prategang

Dalam bentuk yang paling sederhana, diambil bentuk penampang persegi panjang yang diberi gaya prategang oleh sebuah tendon melalui titik berat dan dibebani oleh gaya eksternal. Gaya tarik prategang pada tendon menghasilkan gaya tekan P yang sama pada beton yang bekerja pada titik berat tendon. Pada keadaan ini gaya berada pada titik berat penampang beton. Akibat gaya prategang P , tegangan tekan merata sebesar :

$$f = - \frac{P}{A_c} \quad (2.3)$$

akan timbul pada penampang seluas A_c . Jika M adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, maka tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah :

$$f^t = -\frac{P}{A_c} - \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.4.a)$$

dan

$$f_b = -\frac{P}{A_c} + \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.4.b)$$

dengan

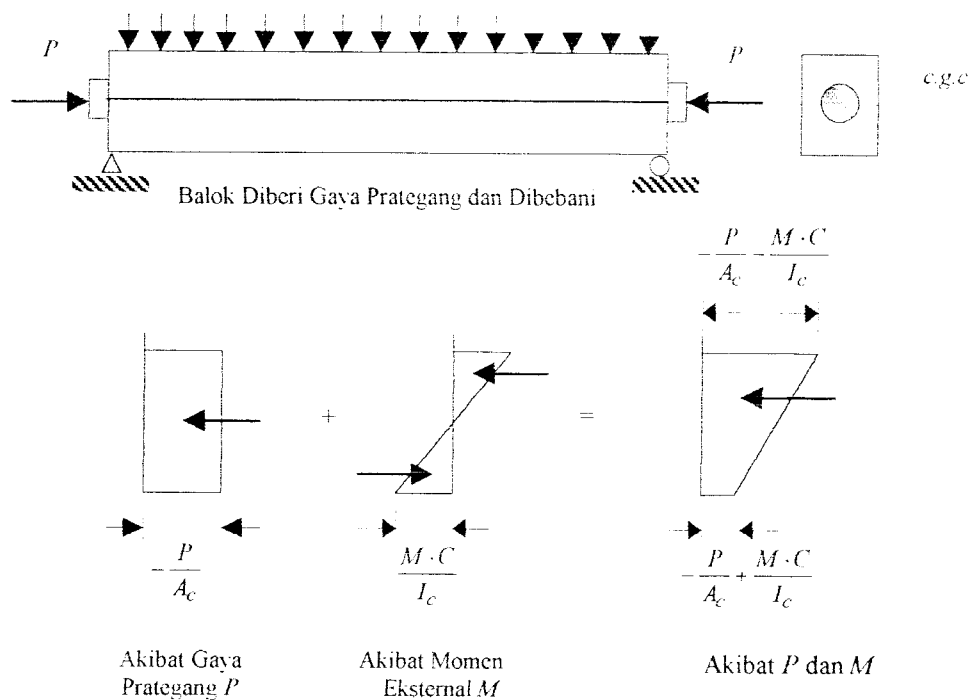
f^t : tegangan pada serat atas dalam kN

f_b : tegangan pada serat bawah dalam kN

M : momen eksternal dalam kN.m

C : jarak dari sumbu yang melalui titik berat tendon dalam m

I_c : momen inersia bruto penampang dalam m^4



Gambar 2.3. Distribusi tegangan sepanjang penampang balok beton prategang sentris

Apabila tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton, resultan gaya tekan P pada beton bekerja pada titik berat tendon yang

berjarak e dari *c.g.c.* Akibat gaya prategang yang eksentrisitas, beton dibebani oleh momen dan beban langsung. Jika momen yang dihasilkan oleh sistem prategang adalah $P \cdot e$ dan tegangan-tegangan akibat momen ini adalah :

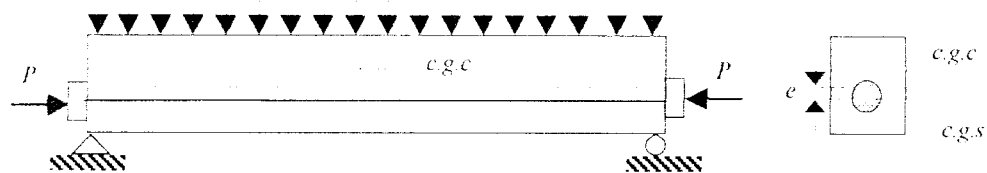
$$f = \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} \quad (2.5)$$

Maka, distribusi tegangan yang dihasilkan adalah :

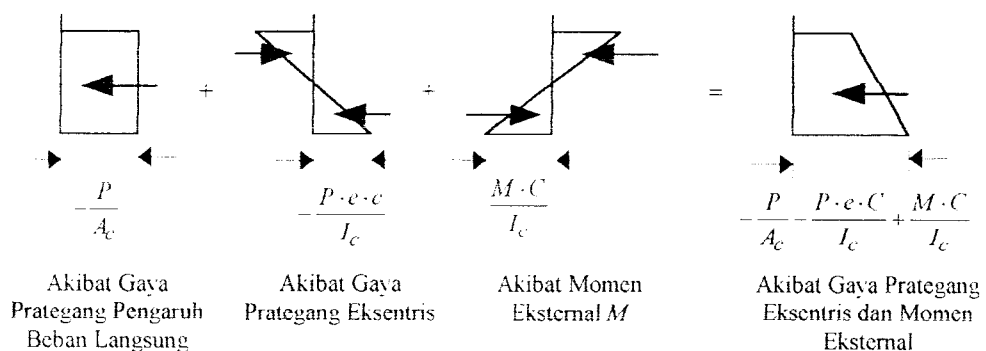
$$f^t = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} - \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.6.a)$$

dan

$$f^b = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} + \frac{M \cdot C}{I_c} \quad (2.6.b)$$



Gaya Prategang secara Eksentrisitas dan Dibebani

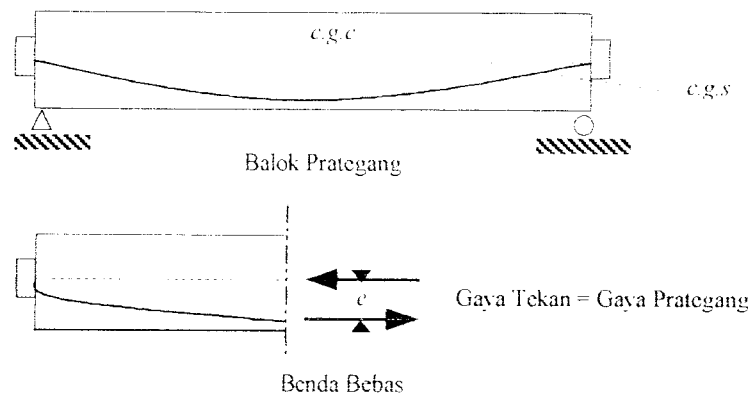


Gambar 2.4. Distribusi tegangan sepanjang penampang beton prategang eksentris

Bila tendon dilengkungkan, seringkali lebih disukai untuk mengambil bagian kiri atau kanan dari batang sebagai benda bebas untuk memulai besarnya pengaruh gaya prategang P . Resultan tekanan pada beton akibat gaya prategang

saja akan sama besarnya dengan gaya kabel P yang bekerja dengan eksentrisitas sebesar e . Jadi pada Gambar 2.5, keseimbangan gaya-gaya horisontal menunjukkan bahwa tekanan pada beton menyamai besarnya gaya prategang P pada baja, dan tegangan pada beton akibat gaya eksentrisitas P dinyatakan dengan,

$$f = -\frac{P}{A_c} \pm \frac{P \cdot e \cdot C}{I_c} \quad (2.7)$$



Gambar 2.5. Pengaruh gaya prategang

Jadi, tegangan beton P pada penampang akibat gaya prategang hanya tergantung pada besar dan letak gaya P pada penampang tanpa memperhatikan perubahan profil tendon di tempat lain sepanjang balok.

Dari Persamaan (2.5.a) dan (2.5.b) dapat dimodifikasi dan disederhanakan untuk digunakan dalam menghitung tegangan-tegangan pada tahap pelimpahan gaya prategang (transfer) dan pada tahap beban kerja (layan). Jika P_i adalah gaya prategang awal sebelum kehilangan tegangan dan P_e adalah gaya prategang efektif setelah kehilangan tegangan, dengan mensubstitusi r^2 untuk I_c/A_c dan S untuk I_c/C

pada Persamaan (2.6.a) dan Persamaan (2.6.b) maka persamaan-persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi :

a. Tegangan saat transfer

1) Pada serat atas :

$$f'_t = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C'_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S'_t} \quad (2.8.a)$$

2) Pada serat bawah :

$$f'_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C'_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S'_b} \quad (2.8.b)$$

b. Tegangan saat layan

1) Pada serat atas :

$$f'_t = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C'_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S'_t} \quad (2.9.a)$$

2) Pada serat bawah :

$$f'_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C'_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S'_b} \quad (2.9.b)$$

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L \quad (2.10)$$

dengan

P_i : gaya prategang awal sebelum kehilangan gaya prategang (kN)

P_e : gaya prategang efektif setelah kehilangan gaya prategang (kN)

e : eksentrisitas tendon (mm)

C'_t : jarak dari sumbu yang melalui titik berat terhadap sisi atas penampang (mm)

C_b : jarak dari sumbu yang melalui titik berat terhadap sisi bawah penampang (mm)

r : jari-jari putar pada penampang (mm^2)

S^t : modulus penampang serat atas (mm^3)

S_b : modulus penampang serat bawah (mm^3)

M_f : momen total (kN.m)

2.5.4 Tata Letak Tendon

Gaya prategang bekerja di dalam daerah *kern* atau inti penampang tidak akan mengakibatkan terjadinya tegangan tarik pada penampang tersebut. Jarak batas ekstrim geometri *kern* dapat dicari, dimana jarak batas ekstrim bawah (k_b) didapat dengan memberikan nilai tegangan beton tepi atas $f^t = 0$, sehingga persamaannya adalah :

$$f^t = -\frac{P}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C^t}{r^2} \right) = 0 \quad (2.11)$$

dengan demikian $\left(1 - \frac{e \cdot C^t}{r^2} \right) = 0$

karena $e = k_b$, maka $\left(1 - \frac{k_b \cdot C^t}{r^2} \right) = 0$

sehingga $k_b = r^2 / C^t$ (2.12.a)

Dengan cara sama, jarak batas ekstrim atas *kern* (k^t) didapatkan dengan memberikan nilai tegangan beton di tepi bawah, $f_b = 0$, sehingga diperoleh :

$$k^t = -r^2 / C_b \quad (2.12.b)$$

tanda negatif (-) menunjukkan jarak k^t diukur ke arah atas dari bagian netral.

Meskipun bukan keharusan mutlak untuk selalu menempatkan titik berat tendon di dalam *kern*, akan tetapi pengetahuan mengenai batas-batas *kern* merupakan acuan penting dalam merencanakan penampang balok prategang. Pada balok dengan perletakan sederhana terdapat dua penampang kritis, pada tengah dan di ujung bentang, ada kemungkinan eksentrisitas tendon sedemikian rupa sehingga letaknya jatuh di luar *kern*. Sedangkan pada tempat di atas perletakan, titik berat tendon prategang harus terletak di dalam *kern* untuk mencegah terjadinya tegangan tarik pada penampang. Dengan demikian, eksentrisitas letak tendon prategang di sepanjang balok harus diatur sedemikian rupa sehingga tidak mengakibatkan timbulnya tegangan-tegangan yang melampaui tegangan ijin yang diharapkan.

Untuk menentukan batasan-batasan daerah ijin letak tendon sepanjang bentangan balok dapat diperoleh dengan berdasarkan hubungan bahwa eksentrisitas tendon merupakan fungsi dari jarak x di sepanjang bentangan.

Dari Persamaan (2.8.a) :

$$f_u \geq -\frac{P_t}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e(x) \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D \cdot (x)}{S_t}$$

$$e(x) \leq f_t \cdot \left(\frac{S_t}{P_t}\right) + \frac{S_t}{A_c} + \frac{M_D \cdot (x)}{P_t} \quad (2.13)$$

Dari Persamaan (2.8.b) :

$$f_a = -\frac{P_t}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e(x) \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D \cdot (x)}{S_b}$$

$$e(x) \leq -f_a \cdot \left(\frac{S_b}{P_t}\right) - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_D \cdot (x)}{P_t} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.13) dan Persamaan (2.14) di atas memberikan batas bawah eksentrisitas tendon sepanjang bentang komponen.

Dari Persamaan (2.9.a) :

$$f_{cs} \geq -\frac{P_c}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e(x) \cdot C''}{r^2} \right) - \frac{M_T \cdot (x)}{S'}$$

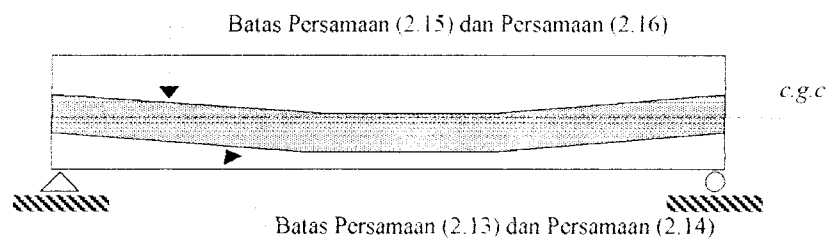
$$e(x) \leq -f_{cs} \cdot \left(\frac{S'}{P_c} \right) + \frac{S'}{A_c} + \frac{M_T \cdot (x)}{P_c} \quad (2.15)$$

Dari Persamaan (2.9.b) :

$$f_{ts} \geq -\frac{P_c}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e(x) \cdot C_b}{r^2} \right) + \frac{M_T \cdot (x)}{S_b}$$

$$e(x) \leq -f_{ts} \cdot \left(\frac{S_b}{P_c} \right) - \frac{S_b}{A_c} + \frac{M_T \cdot (x)}{P_c} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.15) dan Persamaan (2.16) di atas memberikan batas atasnya. Secara umum dapat digambarkan seperti tampak pada Gambar 2.6. yang memberikan rentang daerah ijin letak tendon sepanjang bentang komponen.



Gambar 2.6. Rentang batas letak tendon

2.5.5 Kontrol Tegangan

Akibat dari beban dan gaya yang terjadi pada suatu penampang beton prategang, maka pada masing-masing serat penampang akan terjadi suatu

tegangan. Tegangan-tegangan yang terjadi pada masing-masing serat penampang tersebut tidak boleh melampaui nilai-nilai yang diijinkan. Tegangan ijin beton sesuai SK SNI T- 15 – 1991 – 03 adalah sebagai berikut ini.

1. Sesaat setelah pelimpahan (transfer) gaya prategang

a. Tegangan pada tepi desak, $f_{ci} : 0.60 f'_{ci}$ (2.17.a)

b. Tegangan pada tepi tarik, $f_{ti} : \frac{1}{4} \sqrt{f'_{ci}}$ (2.17.b)

2. Pada beban kerja setelah terjadi kehilangan gaya prategang

a. Tegangan pada tepi desak, $f_{cs} : 0.45 f'_c$ (2.18.a)

b. Tegangan pada tepi tarik, $f_{ts} : \frac{1}{2} \sqrt{f'_c}$ (2.18.b)

Persamaan-persamaan yang dipakai untuk mengendalikan agar tegangan di sepanjang komponen tidak melampaui nilai tegangan ijin adalah :

1. Tegangan saat transfer

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_i}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S_t} \leq f_{ti} \quad (2.19.a)$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_i}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ci} \quad (2.19.b)$$

2. Tegangan saat layan

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_T}{S_t} \leq f_{ts} \quad (2.20.a)$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_T}{S_b} \leq f_{cs} \quad (2.20.b)$$

2.6 Lendutan

2.6.1 Umum

Lendutan didefinisikan sebagai perubahan posisi suatu titik dari batang sebelum bekerjanya beban sampai beban itu bekerja. Pada suatu konstruksi baik pada beton bertulang maupun beton prategang, masalah lendutan ini harus dicermati secara serius, karena kemampuan layanan (*serviceability*) suatu struktur ditentukan oleh masalah lendutan.

Lendutan pada balok prategang berbeda dengan balok bertulang biasa. Pada lendutan balok bertulang biasa hanya dipengaruhi oleh beban yang bekerja padanya selain faktor susut dan rangkai pada lendutan jangka panjang. Pada balok beton prategang lendutan yang terjadi selain dipengaruhi beban yang bekerja, juga dipengaruhi oleh gaya prategang yang bekerja. Lendutan akibat gaya prategang ini dapat digunakan dengan lebih menguntungkan untuk menghasilkan lendutan ke atas (*camber*) yang diinginkan dan menggeser lendutan akibat beban, asalkan lendutan ke atas ini dapat dikontrol.

Secara umum lendutan dibedakan atas dua bagian, yaitu :

1. lendutan jangka pendek, yang terjadi segera setelah beban bekerja,
2. lendutan jangka panjang, yang terjadi setelah perkembangan waktu.

Terdapat faktor-faktor yang tergantung pada waktu dapat memperbesar lendutan, seiring dengan bertambahnya waktu, sehingga dalam mendesain suatu struktur harus dievaluasi lendutan jangka pendek (*short-term*), maupun lendutan jangka panjang (*long-term*) agar lendutan ini terjamin dan tidak akan melebihi suatu

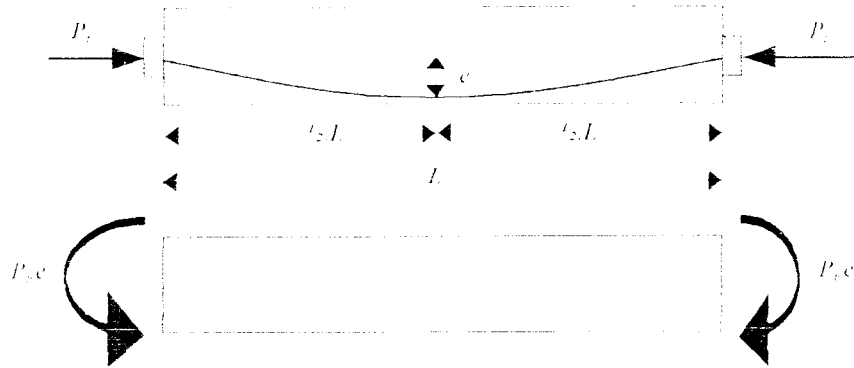
kriteria tertentu. Faktor-faktor yang tergantung waktu ini disebabkan oleh rangkakan (*creep*) dan susut (*shrinkage*) dari beton serta relaksasi (*relaxation*) dari baja.

2.6.2 Lendutan Jangka Pendek (*Short Term*)

Lendutan jangka pendek adalah lendutan yang terjadi segera setelah beban bekerja. Pada balok beton prategang lendutan jangka pendek ini dibedakan menjadi dua bagian, yaitu lendutan ke atas (*camber*) yang diakibatkan oleh gaya prategang dan lendutan akibat berat sendiri balok. Perhitungan lendutan jangka pendek pada balok beton prategang, diasumsikan bahwa sifat penampang beton dianggap sebagai bahan yang elastik dan homogen, walaupun pada kenyataannya modulus elastisitas beton (E_c) tidaklah konstan untuk setiap tegangan, juga modulus elastisitas ini bervariasi seiring dengan umur dari beton itu sendiri dan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain sifat agregat dan semen, kecepatan pembebanan, jenis dan ukuran benda uji.

1. Lendutan ke Atas (*Camber*)

Lendutan ke atas ini diakibatkan oleh gaya prategang yang bekerja. Gaya prategang ini yang terjadi pada baja prategang akan membentuk eksentrisitas (e) terhadap garis normal penampang, yang dengan eksentrisitas ini akan menimbulkan momen sebesar $P_i \cdot e$. Pada Gambar 2.7 diperlihatkan lendutan ke atas atau *camber* dengan gaya prategang yang eksentrisitas terbesarnya pada tengah bentang.

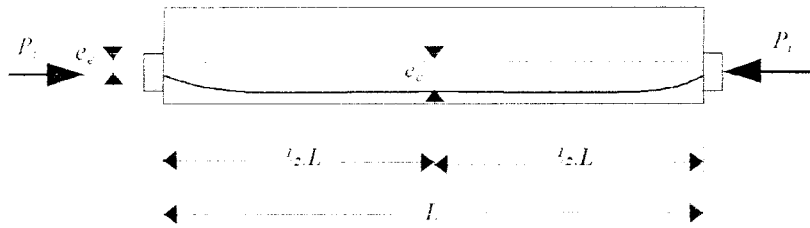


Gambar 2.7. Diagram momen P_i dengan tendon sentris

Lendutan ke atas (*camber*) ini dapat dihitung dengan persamaan :

$$\delta_{pi} = \frac{P_i \cdot e \cdot L^2}{8 \cdot E_c \cdot I_g} \quad (\uparrow) \quad (2.21)$$

Untuk tendon yang letaknya terhadap pusat berat penampang mempunyai eksentrisitas seperti terlihat pada Gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8. Tendon eksentris

Persamaan lendutan ke atas (*camber*) untuk letak tendon yang mempunyai eksentrisitas seperti Gambar 2.8 adalah :

$$\delta_{pi} = \frac{P_i \cdot L^2}{8 \cdot E_c \cdot I_g} \cdot [e_c + 5/6 \cdot (e_c - e_e)] \quad (\uparrow) \quad (2.22)$$

dengan

δ_{pi} : lendutan yang diakibatkan gaya prategang (mm)

P_i : gaya prategang awal pada saat transfer (kN)

e_c : eksentrisitas tendon pada tengah bentang (mm)

e_e : eksentrisitas tendon pada ujung bentang (mm)

L : panjang bentang (m)

E_c : modulus elastisitas beton (Mpa)

I_g : momen inersia bruto penampang (mm^4)

2. Lendutan Akibat Beban Mati

Lendutan akibat beban mati di sini adalah lendutan yang diakibatkan oleh beban mati penampang balok itu sendiri. Karena berat sendiri dari balok prategang, maka di tengah bentang pada tumpuan sederhana akan terjadi momen sebesar $1/8 \cdot q \cdot L^2$. Momen pada tengah bentang ini akan menimbulkan lendutan yang diakibatkan oleh beban mati akibat berat sendiri balok sebesar :

$$\delta_D = \frac{5 \cdot M_D \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_g} \quad (\downarrow) \quad (2.23)$$

2.6.3 Lendutan Jangka Panjang (*Long Term*)

Pada balok beton prategang perhitungan lendutan jangka panjang (*long-term*) yang terjadi akan dipengaruhi oleh lendutan sesaat (lendutan jangka pendek), rangkai beton, susut beton, relaksasi baja, dan kehilangan gaya prategang yang dipengaruhi waktu.

Nawy (1990) memberikan persamaan untuk memprediksi lendutan jangka panjang sesuai lama pembebanan beton prategang dengan memperhitungkan parameter-parameter yang mempengaruhinya adalah sebagai berikut ini.

a. Akibat beban mati:

$$\delta_{SD} = \frac{5 \cdot M_{SD} \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_c} \quad (\downarrow) \quad (2.24)$$

b. Akibat beban hidup :

$$\delta_L = \frac{5 \cdot M_L \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_c} \quad (\downarrow) \quad (2.25)$$

Total lendutan yang terjadi pada akhir umur rencana :

$$\begin{aligned} \delta_{L,t} = & \delta_{P_t} - \delta_D + \left[-\frac{\Delta P}{P_t} + \lambda \cdot k_r \cdot C_t + \left(1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_t} \right) \right] \cdot \delta_{P_t} - (k_r \cdot C_t) \cdot \delta_D \\ & - \delta_{SD} - (k_r \cdot C_t \cdot \beta_s) \cdot \delta_{SD} - \delta_L \end{aligned} \quad (2.26)$$

dengan

δ_{P_t} : lendutan ke atas akibat gaya prategang

ΔP : total kehilangan gaya prategang minus kehilangan elastis beton dikalikan dengan luasan kabel tendon.

P_t : gaya prategang pada saat transfer

δ_{SD} : lendutan akibat beban mati

δ_D : lendutan akibat berat sendiri balok

δ_L : lendutan akibat beban hidup

C_t : koefisien rangkai pada waktu t

β_s : faktor yang berhubungan dengan umur beton

= $1.25 t^{-0.118}$ untuk beton yang dirawat basah

= $1.13 t^{-0.095}$ untuk beton yang dirawat dengan uap panas

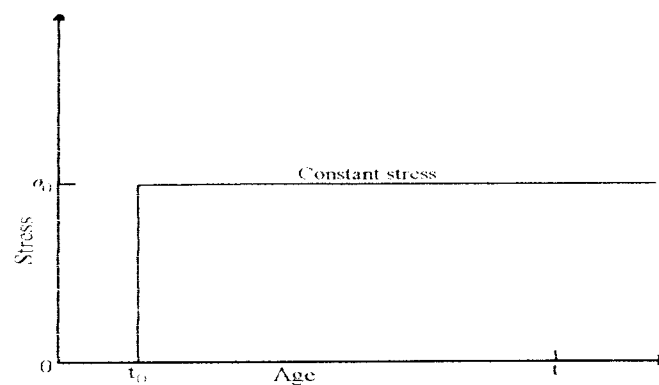
$\lambda = 1 - \Delta P / 2P_t$

$k_r \approx 1.0$

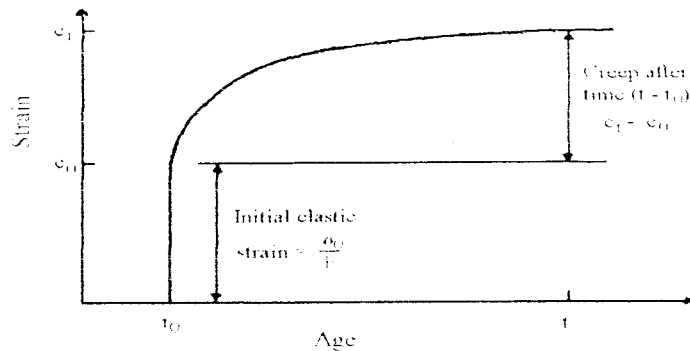
1. Rangkak pada Beton

Beton merupakan material yang bersifat elastis apabila dibebani dalam waktu yang pendek, karena regangan yang ditimbulkan masih bersifat elastis, artinya apabila beban dihilangkan atau ditiadakan maka regangannya akan kembali seperti keadaan semula. Sedangkan regangan yang terjadi pada waktu beton menerima pembebanan tetap akan bertambah perlahan-lahan sejalan dengan waktu, hal ini disebabkan sebagian oleh rangkak beton, sehingga beton bersifat in-elastis.

Rangkak beton (*creep*) adalah besarnya regangan tambahan pada suatu struktur beton yang mengalami regangan konstan, yang diukur dari regangan elastis sampai regangan yang terjadi pada saat tertentu (Nawy,1990). Jadi regangan rangkak merupakan regangan yang terjadi karena fungsi waktu, sedangkan tegangan yang pada struktur tersebut adalah konstan. Hubungan antara tegangan (σ) dan waktu (t) pada definisi rangkak tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9, sedangkan regangan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.10 mengenai hubungan regangan (ε) dan waktu (t).



Gambar 2.9. Hubungan antara tegangan (σ) dan waktu (t) pada definisi rangkak (Nevile, 1985)



Gambar 2.10. Hubungan antara regangan (ϵ) akibat fungsi waktu (t) (Nevile,1985)

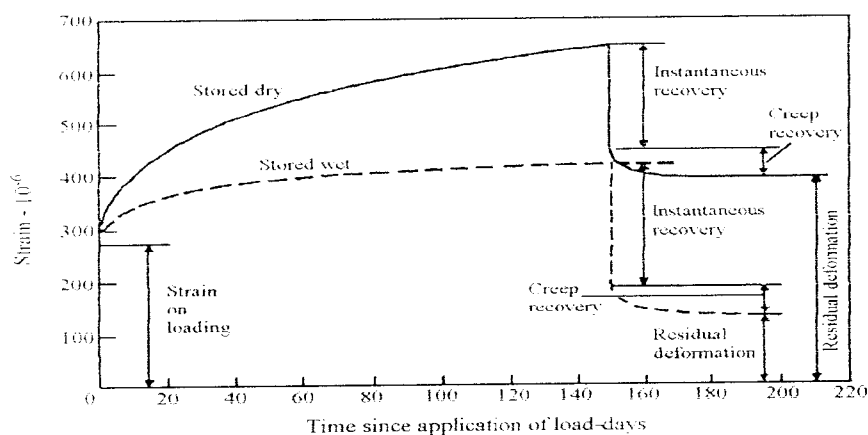
Dari Gambar 2.10 di atas terlihat bahwa akibat rangkak beton regangan akan bertambah besar, akan tetapi kecepatan pertambahan regangannya akan berkurang menurut waktu.

Untuk mengukur besarnya rangkak beton dilakukan percobaan dengan memakai contoh beton dalam kondisi temperatur dan kelembaban konstan serta diberi pembebanan tetap. Pada waktu struktur beton dibebani dengan beban tetap, seketika akan terjadi regangan elastis yang kemudian diikuti oleh regangan rangkak dan susut. Regangan elastis sesungguhnya akan berkurang besarnya sejalan dengan waktu karena modulus elastisitas beton (E_c) adalah fungsi dari kekuatan beton (f'_c), dimana harga f'_c akan bertambah menurut waktu. Pernyataan ini dapat dirumuskan sebagai :

$$\epsilon_c = \frac{f'_c}{E_c} \quad (2.27)$$

Bila modulus elastisitas beton (E_c) bertambah, maka regangan beton (ϵ_c) akan berkurang. Untuk memudahkan dalam perhitungan modulus elastisitas ini biasanya dihitung berdasarkan kekuatan beton (f'_c) pada umur beton 28 hari.

Apabila pembebanan pada struktur beton dihilangkan atau diadakan *unloading* pada waktu t_1 maka regangan elastis seketika akan kembali, tetapi tidak sebesar regangan elastis mula-mula. Regangan pemulihan elastis seketika kembali pada waktu beban dihilangkan disebut pemulihan elastis seketika (*instantaneous recovery*). *Instantaneous recovery* ini diikuti oleh berkurangnya regangan secara perlahan-lahan yang sejalan dengan waktu. Kejadian ini disebut *creep recovery* atau pemulihan rangkak, yang relatif kecil dibandingkan dengan regangan rangkak total, dan sisa regangan yang tidak kembali disebut *residual permanent deformations*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut ini.



Gambar 2.11. Kurva hubungan antara deformasi dengan waktu pembebanan (Nevile, 1985)

Pengaruh yang nyata akibat rangkak adalah lenturan-lenturan yang bertambah seiring dengan bertambahnya waktu. Deformasi oleh rangkak yang tidak elastis ini bertambah dengan tingkat perubahan yang berkurang selama pembebanan, dan jumlah totalnya dapat mencapai besar yang beberapa kali dari deformasi elastis dalam jangka pendek.

Menurut *ACI Comitte 209*, regangan rangkak beton dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

- a. Rangkak dasar (*basic creep*),
- b. Rangkak kering (*drying creep*).

Basic Creep adalah rangkak beton yang terjadi pada kondisi yang tidak terjadi perubahan kadar udara dan sifatnya tidak dipengaruhi oleh kelembapan relatif di sekeliling beton tersebut. *Drying creep* adalah rangkak tambahan yang terjadi karena proses pengeringan yang berhubungan dengan susut beton dan sifatnya tergantung pada kelembaban, temperatur sekeliling serta dimensi dari suatu struktur.

Rangkak adalah fenomena yang sangat bervariasi, karena rangkak dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya deformasi rangkak adalah sebagai berikut ini.

- a. Pemilihan bahan dasar, seperti susunan dari semen, bahan campuran, ukuran susunan butir dan isi zat-zat mineral dari agregat.
- b. Proporsi, seperti kadar air dan perbandingan air semen.
- c. Suhu dan derajat kebasahan sewaktu pengeringan beton.
- d. Kelembaban nisbi selama penyimpanan.
- e. Ukuran dari anggota struktur, khususnya tebal dan perbandingan volume terhadap permukaan.
- f. Umur pada waktu pembebanan.
- g. Nilai slump

1) Pemilihan bahan dasar seperti susunan dari semen, bahan campuran, ukuran susunan butir dan isi zat-zat mineral

Pada dasarnya pemilihan bahan dasar semen akan mempengaruhi tipe semen, sedangkan tipe semen yang dipakai pada suatu struktur beton akan mempengaruhi besarnya kekuatan beton pada waktu pembebanan. Deformasi rangkak (*creep deformation*) tergantung pada kekuatan beton pada saat dibebani. Besar rangkak berbanding terbalik dengan kekuatan beton. Ukuran susunan butir semen akan mempengaruhi perkembangan kekuatan beton pada kondisi awal. Makin tinggi derajat kehalusan semen semakin besar nilai rangkaknya. Dengan penambahan agregat nilai rangkak yang terjadi akan menjadi lebih kecil, pengurangan rangkak yang terjadi akibat pengaruh dari penambahan agregat sangat bervariasi pada tipe agregat yang digunakan.

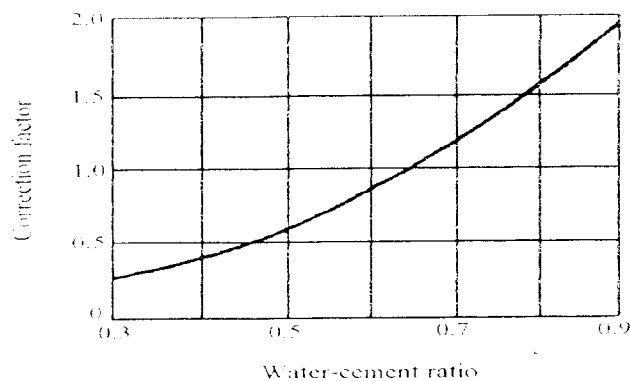
Pengaruh pengurangan campuran air (*admixture water reducing*) dan *set retarding* pada rangkak akan memperbesar deformasi rangkak. Oleh sebab itu sangat penting melakukan pengontrolan pengaruh campuran yang ditambahkan pada campuran beton.

2) Kondisi *Curing*

Yang dimaksud dengan kondisi *curing* disini adalah temperatur dari beton *curing*. Temperatur sangat mempengaruhi besar rangkak yang terjadi, bahwa beton di bawah pembebanan dengan temperatur yang berbeda akan menghasilkan regangan rangkak yang berbeda pula.

3) Faktor Air Semen

Makin besar faktor air semen, maka akan memperendah mutu beton sehingga akan memperbesar rangkak yang terjadi, seperti yang terlihat pada Gambar. 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12 Pengaruh faktor air semen terhadap rangkai pada struktur beton (Nevile, 1985)

4) Kelembaban Relatif di Sekelilingnya Selama Umur Pembebanan Struktur

Selain kondisi dari struktur, faktor luar juga mempengaruhi besarnya rangkai beton. Salah satu faktor luar yang mempengaruhi besarnya rangkai adalah kelembaban relatif di sekeliling struktur, bahwa semakin tinggi kelembaban relatif di sekeliling beton, semakin kecil regangan rangkai yang terjadi.

5) Umur pada Saat Pembebanan

Pembebanan beton pada waktu beton masih muda akan memperbesar terjadinya rangkai, karena saat itu kekuatan beton masih rendah. Penambahan umur beton pada awal pembebanan akan mengurangi regangan rangkai yang terjadi, karena kekuatan beton bertambah besar dengan bertambahnya waktu (umur beton).

6) Lama Pembebanan

Pertambahan besarnya regangan rangkak akan berkurang sejalan dengan lamanya waktu pembebanan, semakin lama pembebanan maka akan semakin kecil pula besarnya pertambahan besarnya rangkak.

7) Perbandingan Volume dengan Luas Permukaan

Rangkak yang terjadi akan berkurang dengan bertambahnya dimensi dari suatu struktur beton. Pengaruh bentuk dan dimensi dari suatu struktur beton dalam perbandingan volume dengan luas permukaan, bila semakin besar perbandingannya maka besarnya rangkak yang terjadi akan semakin kecil.

Bila nilai slump suatu beton besar akan terjadi semakin rendah mutu beton yang didapat, dengan demikian secara tidak langsung akan mempengaruhi nilai rangkak yang terjadi. Semakin besar nilai slump maka nilai rangkak yang terjadi semakin besar pula.

Persamaan untuk memprediksi nilai koefisien rangkak yang diajukan oleh Branson (1977), adalah :

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \cdot C_u \quad (2.28)$$

dengan

C_t : koefisien rangkak pada waktu t (dalam hari)

C_u : koefisien rangkak batas (*ultimate creep coefficient*) = 2.35 K

K : koefisien koreksi untuk rangkak

= 1.0 apabila dalam kondisi standar

Tabel 2.1. Faktor yang mempengaruhi rangkai pada beton dalam kondisi standar

| Keterangan | Kondisi Standar |
|-----------------------------|-----------------------------|
| tipe semen | tipe I dan III |
| slump beton | 2.7 in |
| kadar udara | < 6 % |
| kehalusan agregat | 50 % |
| kadar semen | 278 – 446 kg/m ³ |
| <i>initial moist curing</i> | 7 hari |
| kelembaban relatif | 40 % |
| temperatur beton | 23 ± 2 °C |

Sumber : *ACI Commite 209*

Untuk kondisi di luar standar, maka harus dikalikan dengan faktor koreksi.

Faktor koreksi-koreksi yang mempengaruhinya rangkai pada beton antara lain:

1) Umur Beton Saat Pembebanan (K_{T0})

a. Untuk beton dirawat dengan pembasahan (*moist cured concrete*)

$$K_{T0} = 1.258 (t)^{-0.118} \quad (2.29.a)$$

b. Untuk beton yang dirawat dengan uap panas (*steam cured concrete*)

$$K_{T0} = 1.13 (t)^{-0.095} \quad (2.29.b)$$

dengan t adalah umur saat pembebanan.

2) Kelembaban Relatif (K_H)

$$K_H = 1.27 - 0.0067 H \quad (\text{untuk } H > 40 \%) \quad (2.30)$$

dengan H adalah kelembaban relatif dalam persen.

3) Ratio Penampang (K_T)

$$K_T = 1.12 - 0.8 v_s \quad (\text{untuk } v_s > 1.5 \text{ inch}) \quad (2.31)$$

4) Nilai Slump Beton (K_S)

$$K_S = 0.82 + 0.67 S \quad (2.32)$$

dengan S adalah nilai slump beton (inch)

5) Kadar Agregat (K_F)

$$K_F = 0.88 + 0.0024 F \quad (2.33)$$

dengan F adalah kadar agregat terhadap berat dalam persen.

6) Kadar Udara (K_A)

$$K_A = 1.00 \quad (\text{untuk } A < 6 \%) \quad (2.34.a)$$

$$K_A = 0.46 + 0.008 A \quad (\text{untuk } A > 6 \%) \quad (2.34.b)$$

dengan A adalah kadar udara dalam persen

Persamaan koefisien rangkai batas untuk kondisi di luar standar adalah :

$$C_u = 2.35 \cdot K_{TO} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_F \cdot K_A \quad (2.35)$$

2. Susut pada Beton

Beton adalah suatu bahan struktur yang kuat dan padat yang merupakan hasil campuran dari partikel-partikel yang dilekatkan oleh pasta yang terbuat dari *cement portland* dan air. Pasta itu mengisi ruang-ruang yang kosong di antara partikel-partikel agregat, dan setelah beton dicorokan, maka campuran itu mengeras akibat dari reaksi-reaksi kimia eksotermis antara semen dan air. Pada waktu mencapai kondisi kuat dan padat tersebut, beton mengalami perubahan volume, hal ini diakibatkan oleh reaksi kimia dan hidrasi, serta penguapan air campuran yang tidak terikat oleh semen.

Pada dasarnya susut dibagi atas dua bagian :

- a. susut plastis,
- b. susut pengeringan.

Susut plastis adalah susut yang terjadi beberapa jam setelah beton segar dicor ke dalam acuan. Permukaan yang diekspos seperti pelat lantai akan lebih dipengaruhi oleh udara kering karena adanya bidang kontak yang luas. Dalam hal demikian terjadi penguapan yang lebih cepat melalui permukaan beton dibandingkan dengan pergantian air dari lapisan beton yang lebih bawah. Susut pengeringan adalah susut yang terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi semen telah selesai.

Fenomena sebaliknya, yaitu penambahan volume karena penyerapan air yang disebut dengan *swelling*. Dengan perkataan lain susut dan *swelling* menunjukkan adanya perbedaan kelembaban atau perbedaan kejenuhan di antara elemen-elemen yang berdekatan. Fenomena ini tidak tergantung pada beban luar yang terjadi. Laju perubahan susut ini berkurang terhadap waktu, karena beton yang semakin berumur akan semakin tahan tegangan dan semakin sedikit mengalami susut. Susut biasanya dinyatakan dengan regangan susut (ϵ_{SH}) yang nilainya sangat bervariasi dan sangat tergantung pada bahan yang digunakan sebagai campuran beton dan perawatan beton itu sendiri.

Susut seperti pada rangkai merupakan fenomena yang sangat bervariasi dan ditentukan oleh banyak faktor. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut ini.

1) Agregat.

Agregat berlaku sebagai penahan susut pada beton. Jadi, beton dengan kandungan agregat yang semakin tinggi akan semakin berkurang perubahan volumenya akibat susut. Lagi pula derajat ketahanan beton ditentukan oleh sifat agregatnya, yaitu dengan modulus elastisitas yang tinggi atau dengan permukaan yang kasar akan lebih tahan terhadap proses susut.

2) Faktor air semen.

Semakin besar faktor air semen, akan semakin besar pula efek susutnya.

3) Ukuran elemen beton.

Kelanjutan dan besarnya susut akan berkurang apabila volume betonnya semakin besar. Akan tetapi terjadinya susut akan semakin lama untuk elemen yang lebih besar karena lebih banyak waktu yang diperlukan untuk pengeringan sampai ke bagian dalam. Sebagai contoh mungkin diperlukan waktu sampai satu tahun untuk mencapai pengeringan pada kedalaman 10 inch dari permukaan luar dan sepuluh tahun untuk mencapai 24 inch dari permukaan luar.

4) Kondisi lingkungan.

Kelembaban relatif di sekeliling beton sangat mempengaruhi besarnya susut, laju perubahan susut semakin kecil pada lingkungan dengan kelembaban relatif tinggi. Temperatur di sekeliling juga merupakan faktor yang menentukan, yaitu susut akan tertahan pada temperatur rendah.

5) Banyaknya penulangan.

Beton bertulang lebih sedikit susutnya dibandingkan dengan beton sederhana, perbedaan relatifnya merupakan fungsi dari persentase tulangan.

6) Bahan tambahan pada campuran beton.

Pengaruh ini sangat bervariasi bergantung pada bahan tambahan yang digunakan. Aselelarator seperti kalsium klorida digunakan untuk mempercepat proses pengerasan beton dan memperbesar susut. Pozzolon juga dapat menambah susut, sedangkan bahan *air-entraining* hanya mempunyai sedikit pengaruh terhadap susut.

7) Jenis semen.

Susut karbonasi disebabkan oleh adanya reaksi antara karbondioksida (CO_2) yang ada di udara dan yang ada dalam pasta semen. Besarnya susut karbonasi bervariasi, bergantung pada urutan kejadian antara proses susut karbonasi dan susut pengeringan. Jika kedua fenomena ini terjadi bersamaan maka susut yang terjadi lebih kecil. Berbeda dengan proses susut pengeringan proses karbonasi sangat berkurang pada kelembaban relatif di bawah 50 %.

Untuk memprediksi nilai rangkai, Branson (1977) memberikan suatu persamaan koefisien regangan susut pada keadaan standar.

- a) Untuk waktu t setelah umur 7 hari dari beton yang dikeringkan dengan udara (*moist cured concrete*)

$$\varepsilon_{SH} = \frac{t}{35 + t} \cdot (\varepsilon_{SH})_U \quad (2.36.a)$$

- b) Untuk waktu t setelah 1 sampai 3 hari dari beton yang dikeringkan dengan uap panas (*steam cured concrete*).

$$\varepsilon_{SH} = \frac{t}{55 + t} \cdot (\varepsilon_{SH})_U \quad (2.36.b)$$

dengan

ε_{SH} : regangan susut pada waktu setelah pengerasan

t : waktu setelah pengerasan awal (dalam hari)

$(\varepsilon_{SH})_U$: regangan susut batas

$$= 820 \times 10^{-6} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_F \cdot K_A \quad (\text{inch} / \text{inch}) \text{ untuk } \textit{moist} \\ \textit{cured concrete}$$

$$= 730 \times 10^{-6} \cdot K_H \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_B \cdot K_F \cdot K_A \text{ untuk steam cured concrete}$$

Untuk kondisi di luar standar, maka harus mengalikan semua faktor koreksi yang mempengaruhinya. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut ini.

1) Kelembaban Relatif (K_H)

$$K_H = 1.4 - 0.01 H \quad (\text{untuk } 40\% < H < 80\%) \quad (2.37.a)$$

$$K_H = 3.00 - 0.03 H \quad (\text{untuk } 80\% < H < 100\%) \quad (2.37.b)$$

dengan H adalah kelembaban relatif (dalam persen)

2) Rasio Penampang (K_P)

$$K_P = 1.14 - 0.009 v_s \quad (\text{untuk } v_s > 1.5) \quad (2.38)$$

dengan v_s adalah rasio penampang (dalam inch)

3) Nilai Slump Beton (K_S)

$$K_S = 0.89 - 0.041 S \quad (2.39)$$

dengan S adalah nilai slump (dalam inch)

4) Berat Semen (K_B)

$$K_B = 0.75 + 0.034 B \quad (2.40)$$

dengan B adalah berat semen dalam satu sak (lb)

5) Agregat Halus (K_F)

$$K_F = 0.30 + 0.014 F \quad (\text{untuk } F < 50\%) \quad (2.41.a)$$

$$K_F = 0.90 + 0.020 F \quad (\text{untuk } F > 50\%) \quad (2.41.b)$$

dengan F adalah perbandingan agregat terhadap berat (dalam persen)

6) Kadar Udara (K_A)

$$K_A = 0.95 + 0.008 A \quad (2.42)$$

dengan A adalah kadar udara (dalam persen)

2.6.4 Kehilangan Tegangan Tendon

1. Akibat Pengangkuran

Untuk kebanyakan sistem *post tensioned*, pada saat tendon ditarik sampai nilai yang penuh dongkrak dilepas dan gaya prategang dialihkan ke angkur. Perlengkapan di dalam angkur yang mengalami tegangan pada saat peralihan cenderung untuk berdeformasi, jadi tendon dapat tergelincir sedikit. Besarnya nilai gelincir ini rata-rata 2.5 mm.

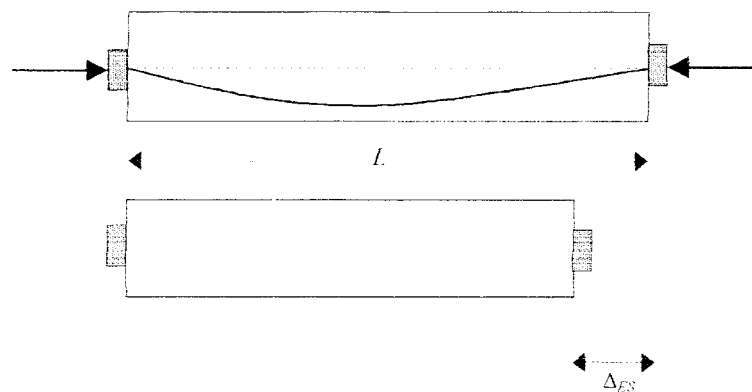
Lin dan Burns (1993) memberikan rumus umum untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran, yaitu :

$$\Delta f_{p-AN} = \frac{\Delta_a \cdot E_{ps}}{L} \quad (2.43)$$

dengan Δ_a : besarnya penggelinciran (mm)

2. Akibat Deformasi Elastis Beton

Pada saat gaya prategang ditransfer ke beton, komponen struktur akan memendek seiring dengan memendeknya baja akibat dilepasnya tendon dari alat penarik (*jacking*). Pertama-tama ditinjau perpendekan beton searah sumbu yang hanya diakibatkan oleh gaya prategang.



Gambar 2.13 Perpendekan elastis beton

Persamaan regangan elastis pada beton adalah :

$$\varepsilon_{ES} = \Delta_{ES} / L \quad (2.44)$$

Kehilangan tegangan :

$$\Delta f_{p-ES} = E_{ps} \cdot \varepsilon_{ES} = \frac{E_{ps} \cdot P_t}{A_c \cdot E_c} = \frac{n \cdot P_t}{A_c} = n \cdot f_{cs} \quad (2.45)$$

Untuk kondisi akibat pengaruh momen-momen yang terjadi maka nilai

$$f_{cs} = \frac{P_t}{A} \cdot \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_D \cdot e}{I} \quad (2.46)$$

Rekomendasi ACI-ASCE dalam Lin dan Burns (1993), untuk kehilangan elastik beton memperhitungkan pengaruh penarikan berturut-turut pada kehilangan elastik, maka kehilangan gaya prategang menjadi :

$$\Delta f_{p-ES} = K_{ES} \cdot n \cdot f_{cs} \quad (2.47)$$

dengan

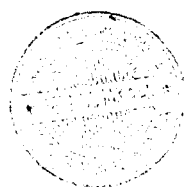
$$K_{ES} = 1.0 \text{ untuk komponen struktur } \textit{pretensioned}$$

$$= 0.5 \text{ untuk komponen struktur } \textit{post tensined} \text{ bila kabel-kabel secara berturut-turut ditarik dengan gaya yang sama}$$

n : rasio modulus pada saat peralihan

3. Akibat Gesekan

Gesekan yang terjadi pada sistem pendongkrakan dan pengangkutan umumnya kecil meskipun bukan tak berarti. Harus diingat bahwa jumlah penarikan yang berlebihan harus dibatasi agar tetap berada di dalam titik leleh kawat. Peraturan ACI memberikan gaya dongkrak sampai $0.80 f_{pu}$. Kehilangan gaya prategang lebih serius terjadi di antara tendon dan bahan-bahan sekelilingnya



baik itu berupa beton atau selubung (*sheathing*), dan apakah diberi pelumas atau tidak. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini dapat dipertimbangkan pada dua bagian, yaitu pengaruh panjang dan kelengkungan.

Pengaruh panjang adalah jumlah gesekan yang akan dijumpai jika tendon lurus, tidak dirancang bengkok atau melengkung. Karena dalam praktek selubung beton tidak dapat lurus sepenuhnya, gesekan akan ada di antara tendon dan bahan sekelilingnya meskipun tendon dimaksudkan harus lurus. Hal ini dijelaskan sebagai pengaruh turun naiknya selubung (*wobbling effect*) tergantung dari panjang dan tegangan tendon, koefisien gesekan antara bahan yang bersentuhan, dan keterampilan pekerja dan metode yang digunakan dalam meluruskan selubung.

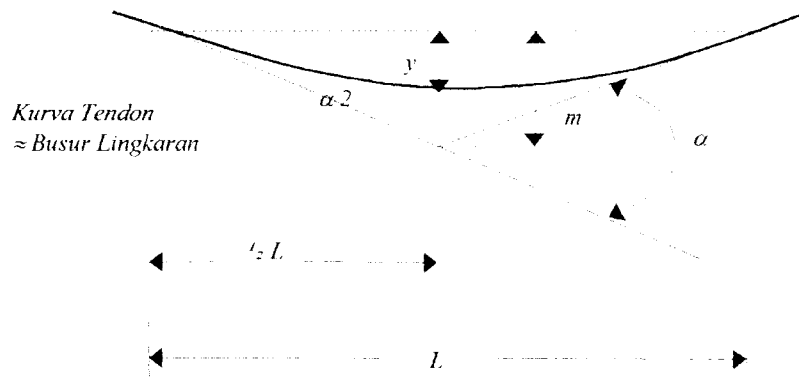
Beberapa nilai pendekatan untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini diberikan pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon-tendon *post tensioned*

| Tipe Tendon | Koefisien Wobble K tiap meter | Koefisien Kelengkungan μ |
|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Tendon pada selubung logam fleksibel | | |
| Tendon kawat | 0.0033-0.0049 | 0.15-0.25 |
| Strand dengan untaian 7-kawat | 0.0016-0.0066 | 0.15-0.25 |
| Batang baja mutu tinggi | 0.0003-0.0020 | 0.08-0.30 |
| Tendon pada selubung logam kaku | | |
| Strand dengan untaian 7-kawat | 0.0007 | 0.15-0.25 |
| Tendon yang diminyaki terlebih dahulu | | |
| Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat | 0.001-0.0066 | 0.05-0.15 |
| Tendon yang diberi lapisan mastik | | |
| Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat | 0.0033-0.0066 | 0.05-0.15 |

Sumber : **Pembahasan Peraturan ACI (Lin dan Burns, 1993)**

Sebagai pertimbangan praktis dalam mencari nilai pendekatan kehilangan gaya prategang akibat gesekan sepanjang kurva tendon dapat ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14. Pendekatan sudut pusat tendon

Lin dan Burns (1993) memberikan persamaan untuk memprediksi kehilangan gaya prategang akibat gesekan sebagai berikut :

$$\Delta f_{pv} = f_{pi} \cdot [(\mu \cdot \alpha) + (K \cdot L)] \quad (2.48)$$

dengan

α : sudut yang dibentuk tendon

$$= \frac{8 \cdot e}{L} \quad (\text{radian})$$

μ : koefisien kelengkungan tendon

K : koefisien naik turun selubung tendon

4. Akibat Rangkak pada Beton

Rangkak pada beton didefinisikan sebagai perubahan regangan yang terjadi pada beton yang mengalami tegangan konstan. Seperti halnya dengan susut, yang disebabkan oleh perubahan kelembaban relatif beton. Selain itu, untuk beton

baik itu berupa beton atau selubung (*sheathing*), dan apakah diberi pelumas atau tidak. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini dapat dipertimbangkan pada dua bagian, yaitu pengaruh panjang dan kelengkungan.

Pengaruh panjang adalah jumlah gesekan yang akan dijumpai jika tendon lurus, tidak dirancang bengkok atau melengkung. Karena dalam praktek selubung beton tidak dapat lurus sepenuhnya, gesekan akan ada di antara tendon dan bahan sekelilingnya meskipun tendon dimaksudkan harus lurus. Hal ini dijelaskan sebagai pengaruh turun naiknya selubung (*wobbling effect*) tergantung dari panjang dan tegangan tendon, koefisien gesekan antara bahan yang bersentuhan, dan keterampilan pekerja dan metode yang digunakan dalam meluruskan selubung.

Beberapa nilai pendekatan untuk menghitung kehilangan gaya prategang akibat gesekan ini diberikan pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2. Koefisien-koefisien gesekan untuk tendon-tendon *post tensioned*

| Tipe Tendon | Koefisien Wobble K tiap meter | Koefisien Kelengkungan μ |
|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Tendon pada selubung logam fleksibel | | |
| Tendon kawat | 0.0033-0.0049 | 0.15-0.25 |
| Strand dengan untaian 7-kawat | 0.0016-0.0066 | 0.15-0.25 |
| Batang baja mutu tinggi | 0.0003-0.0020 | 0.08-0.30 |
| Tendon pada selubung logam kaku | | |
| Strand dengan untaian 7-kawat | 0.0007 | 0.15-0.25 |
| Tendon yang diminyaki terlebih dahulu | | |
| Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat | 0.001-0.0066 | 0.05-0.15 |
| Tendon yang diberi lapisan mastik | | |
| Tendon kawat dan strand dengan untaian 7-kawat | 0.0033-0.0066 | 0.05-0.15 |

saat diberikan gaya prategang dan jenis beton yang digunakan akan turut mempengaruhi besarnya rangkak yang terjadi. Dalam balok beton prategang, tekanan yang menyebabkan rangkak tidak konstan. Tetapi berkurang dengan bertambahnya waktu akibat relaksasi tegangan baja dan susut beton. Hal tersebut menyebabkan perubahan panjang yang berkaitan dengan rangkak itu sendiri.

Tegangan beton yang dijadikan dasar dalam perhitungan kehilangan tegangan akibat rangkak adalah tegangan beton pada posisi baja, sedangkan rangkak dianggap terjadi setelah penambahan beban mati permanen pada elemen struktur setelah beton diberi gaya prategang. Sehingga resultan dari regangan tekan awal akibat gaya prategang yang terjadi segera setelah transfer dan regangan tarik akibat beban mati permanen merupakan variabel yang digunakan dalam perhitungan rangkak. Kehilangan tegangan akibat rangkak untuk elemen struktur dengan tendon yang terekat dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$\Delta f_{p-CR} = n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \quad (2.49)$$

dengan:

$K_{CR} = 2.0$ untuk elemen struktur pratarik

$K_{CR} = 1.6$ untuk elemen struktur pasca tarik

f_{cs} : tegangan beton di posisi baja setelah transfer

f_{csd} : tegangan beton di posisi baja akibat penambahan beban mati tambahan

$$= \frac{M_{SD} \cdot e}{I} \quad (2.50)$$

n : rasio modulus elastis

$$= E_{ps} / E_c \quad (2.51)$$

5. Akibat Susut Beton

Susut pada beton dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti rangkai, dalam perhitungan-perhitungan kehilangan gaya prategang dari sumber ini akan menggambarkan yang mana hal-hal paling penting, yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaan, kelembaban relatif dan waktu dari akhir perawatan sampai dengan bekerjanya gaya prategang.

Kehilangan gaya prategang akibat susut beton dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut :

$$\Delta f_{p-SH} = \epsilon_{SH} \cdot E_{ps} \quad (2.52)$$

dengan :

ϵ_{SH} : regangan susut yang dipengaruhi faktor koreksi

E_{ps} : modulus elastisitas tendon

Seperti halnya rangkai, terdapat variasi terhadap besarnya nilai regangan. Untuk perhitungan diambil regangan susut rata-rata sebesar 550×10^{-6} in/in. Dan faktor-faktor seperti perbandingan volume terhadap luas permukaan (v/s) dan kelembaban relatif (RH) akan sangat berpengaruh pada besarnya nilai regangan susut. Besarnya regangan susut beton dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \epsilon_{SH} &= 550 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.06 \cdot v/s) \cdot (1.5 - 0.015 \cdot RH) \\ &= 8.2 \times 10^{-6} \cdot (1 - 0.06 \cdot v/s) \cdot (100 - RH) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Untuk berbagai kondisi perawatan dan faktor yang mempengaruhi besarnya regangan susut dapat dihitung dengan Persamaan (2.26.a) sampai (2.31.b). Untuk elemen struktur *post tensioned* pengangkutan tendon dilakukan setelah sebagian

susut beton terjadi. Hal ini menguntungkan karena terdapat reduksi terhadap besarnya kehilangan tegangan akibat susut, maka Persamaan (2.47) dikoreksi dengan faktor K_{SH} untuk elemen struktur *post tensioned*. Besarnya nilai-nilai K_{SH} dapat dilihat pada Tabel 2.3, sehingga besarnya kehilangan tegangan akibat susut beton dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta f_{p-SH} = \epsilon_{SH} \cdot K_{SH} \cdot E_{ps} \quad (2.54)$$

Tabel 2.3 Nilai K_{SH} untuk elemen *post tensioned*

| Jangka waktu setelah perawatan basah sampai pada penerapan gaya 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 |

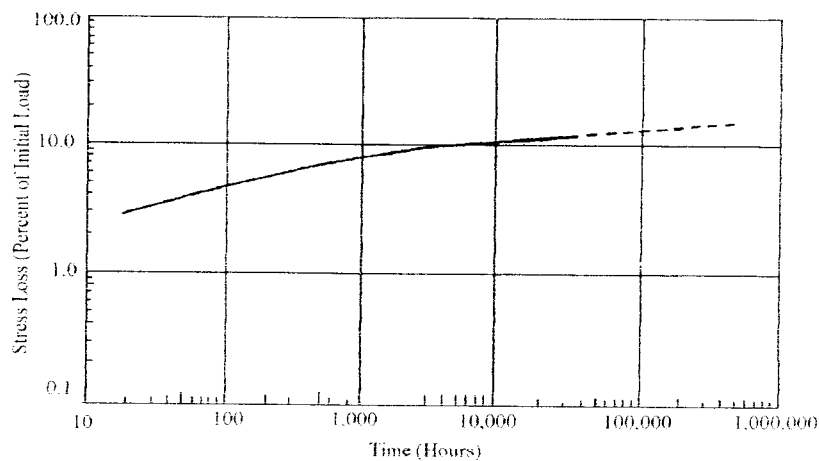
Sumber: T.Y. Lin & Burns (1993)

6. Akibat Relaksasi Baja

Relaksasi didefinisikan sebagai kehilangan tegangan dalam suatu material yang dikenai tegangan dan dijaga pada regangan konstan. Walaupun tidak mengalami regangan konstan, hal ini umumnya disesuaikan pada kondisi yang lebih mendekati regangan konstan. Karena itu studi tentang relaksasi dibuat untuk mengevaluasi kehilangan prategang yang menjadikan perilaku baja tidak elastis.

Tendon prategang yang ditegangkan pada dasarnya mempunyai panjang konstan selama umur struktur. Walaupun ada beberapa reduksi panjang akibat susut dan rangkai beton akan menghasilkan perubahan volume atau panjang yang tak elastis. Sebab tendon yang diangkurkan ke beton dengan rekatan atau angkur ujung, perubahan panjang beton menghasilkan perubahan panjang tendon

sehingga dapat mereduksi kehilangan tegangan akibat relaksasi tegangan baja tergantung pada intensitas tegangan baja maupun waktu.



Gambar 2.15. Kurva kehilangan tegangan terhadap waktu untuk kawat *stress relieved* pada $70\% f_{pu}$ dan dijaga pada panjang konstan dengan suhu 85°F .
(Libby, 1987)

Rasio tegangan antara reduksi tegangan f_p dengan tegangan awal f_{pi} dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\frac{f_p}{f'_{pi}} = 1 - \frac{\log t}{10} \cdot \left[\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right] \quad (2.55)$$

dengan f_{py} adalah tegangan leleh efektif, t adalah waktu dalam jam setelah penarikan, $\log t$ dengan bilangan dasar sepuluh dan f'_{pi} / f_{py} tidak kurang dari 0.55.

Sehingga kehilangan tegangan akibat relaksasi baja adalah :

$$\Delta f'_{p-RE} = f'_{pi} \left[\frac{\log t}{10} \right] \cdot \left[\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right] \quad (2.56)$$

2.6.5 Kontrol Lendutan

Defleksi yang diijinkan pada sistem struktur sangat tergantung pada besarnya defleksi yang dapat ditahan oleh komponen-komponen yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estesis dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi. Dapat diterima atau tidaknya besar defleksi merupakan fungsi dari faktor-faktor seperti jenis bangunan, digunakan atau tidaknya partisi, ada atau tidaknya langit-langit, ataupun kepekaan peralatan atau sistem mesin yang ditumpu oleh lantai tersebut, karena pembatasan defleksi harus ada untuk taraf beban kerja, maka struktur-struktur yang dirancang secara konservatif, yaitu tegangan beton dan baja cukup kecil pada umumnya tidak mempunyai masalah dalam hal defleksi.

Struktur-struktur pada masa sekarang dirancang dengan menggunakan prosedur kekuatan batas (*ultimate*), yaitu dengan memanfaatkan kekuatan tinggi baja dengan betonnya, dengan demikian akan diperoleh elemen-elemen struktur yang semakin langsing, dan dalam hal demikian defleksi sesaat maupun jangka panjang sangat perlu dikontrol. Peraturan ACI mensyaratkan bahwa defleksi yang dihitung pada balok atau slab satu arah harus memenuhi persyaratan *serviceability* mengenai defleksi yang diijinkan pada berbagai kondisi struktural, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Angka Perbandingan bentang (L) dengan defleksi (δ) maksimum yang diijinkan

| Jenis elemen struktur | Defleksi yang Ditinjau | (L/δ) |
|---|---|------------------|
| Atap datar yang tidak memikul dan padanya tidak terpasang elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar | Defleksi sesaat, akibat beban hidup L | 180 ^a |
| Lantai-lantai yang tidak memikul dan padanya tidak terpasang elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar | Defleksi sesaat akibat beban hidup L | 360 ^b |
| Konstruksi atap atau lantai yang padanya tidak berpasangan elemen-elemen nonstruktural yang dapat rusak oleh defleksi besar | Sebagian dari defleksi total yang terjadi sesudah pemasangan elemen nonstruktural, jumlah dari semua beban <i>sustained</i> ideal ditambah sebagian dari beban hidup yang <i>sustained</i> dan defleksi sesaat akibat suatu beban hidup tambahan. | 480 ^c |
| Konstruksi atap atau lantai yang memikul atau padanya terpasang elemen nonstruktural yang tidak akan rusak defleksi besar | | 240 ^c |

Sumber : Nawy (1990)

- ^a Batas-batas yang ada di sini tidak ditujukan untuk pengamanan terhadap pengalaman. Pengalaman harus dicek dengan menggunakan perhitungan defleksi yang sesuai, yang memasukkan juga tambahan defleksi akibat air yang tertampung tersebut, dan meninjau juga efek-efek jangka panjang akibat beban *sustained*, toleransi-toleransi konstruksi dan keandalan yang diijinkan untuk drainase.

^b Defleksi jangka panjang harus ditentukan, tetapi defleksi yang dihitung ini dapat dikurangi dengan defleksi yang terjadi sebelum pemasangan elemen-elemen nonstruktural. Reduksi ini besarnya bergantung pada data-data teknik yang dapat diterima mengenai karakteristik hubungan defleksi waktu pada elemen struktur tersebut.

^c Batas perbandingan ini dapat lebih kecil dari pada tercantum apabila ada pengukuran yang baik dalam mencegah kerusakan elemen yang terpasang tersebut, tetapi tidak boleh lebih kecil daripada toleransi elemen-elemen struktur tersebut.

BAB III

PERENCANAAN DAN ANALISIS

3.1 Data Analisis

Data-data yang dipergunakan dalam menganalisis balok beton prategang antara lain sebagai berikut ini.

1. Bentang balok : $L = 20$ m
2. Jarak balok : $B = 3.0$ m
3. Baja prategang : $f_{pu} = 1860$ Mpa
4. Beton prategang :
 - a. $f'_c = 45$ Mpa
 - b. $\gamma = 2.5$ t/m³
5. Beban mati : $w_{SD} = 0.5$ t/m²
6. Beban hidup : $w_L = 0.4$ t/m²
7. Kehilangan gaya prategang dianggap 20 %
8. Pemberian gaya prategang pada 21 hari setelah pengerasan awal.
9. Kelembaban relatif sebesar 60%.
10. Balok beton mendapat beban luar 1 hari setelah pemberian gaya prategang.

3.2 Tegangan Ijin Beton

Tegangan yang terjadi pada balok beton prategang harus memenuhi persyaratan tegangan ijin pada Persamaan 2.17a sampai dengan 2.18b.

1. Saat transfer :

$$\begin{aligned} \text{a. } f_{ci} &= 0.6 \times f'_{ci} \\ &= 0.6 \times 0.95 \times 45 = -25.65 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } f_{ti} &= 0.25 \times \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0.25 \times \sqrt{0.95 \times 45} = 1.6346 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

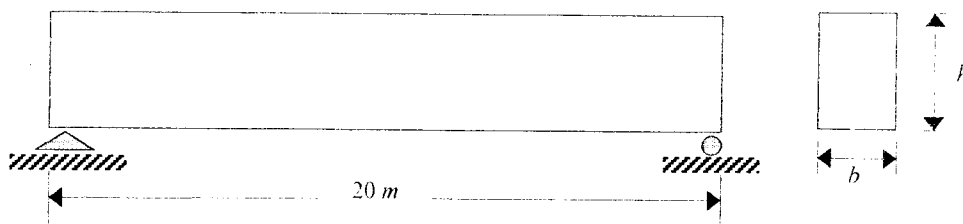
2. Saat layan :

$$\begin{aligned} \text{a. } f_{cs} &= 0.45 \times f'_c \\ &= 0.45 \times 45 = -20.25 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } f_{ts} &= 0.5 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 0.5 \times \sqrt{45} = 3.354 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

3.3 Perencanaan Tampang Balok

Pada perencanaan berikut ini, perhitungan dengan menggunakan tampang balok bentuk persegi panjang.



Gambar 3.1. Bentang balok bentuk tampang persegi

3.3.1 Perhitungan Momen Lentur

- a. Akibat beban mati (w_{SD}) :

$$w_{SD} = 0.5 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.50 \text{ t/m}$$

$$M_{SD} = 1/8 \times w_{SD} \times L^2$$

$$= 1/8 \times 1.5 \times 20^2$$

$$= 75 \text{ t.m} = 73.5503 \cdot 10^7 \text{ N. mm}$$

- b. Akibat beban hidup (w_L) :

$$w_L = 0.4 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.20 \text{ t/m}$$

$$M_L = 1/8 \times w_L \times L^2$$

$$= 1/8 \times 1.20 \times 20^2$$

$$= 60 \text{ t.m} = 58.8402 \cdot 10^7 \text{ N. mm}$$

- c. Akibat berat sendiri (w_{SD}) :

$$\text{Ditaksir : } w_{SD} = 0.45 \text{ t/m}^2 \times 3.0 \text{ m} = 1.35 \text{ t/m}$$

$$M_D = 1/8 \times w_D \times L^2$$

$$= 1/8 \times 1.35 \times 20^2$$

$$= 67.50 \text{ t.m} = 66.1953 \cdot 10^7 \text{ N. mm}$$

3.3.2 Perhitungan Modulus Tampang Rencana

Modulus penampang rencana dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.2.a) dan (2.2.b).

- a. Serat atas :

$$S' = \frac{(1-R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{R \cdot f_u - f_{cs}}$$

$$= \frac{(1-0.8) \times 66.1953 \cdot 10^7 + 73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7}{(0.8 \times 1.6346) + 20.25}$$

$$= 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

b. Serat bawah :

$$S_b = \frac{(1-R) \cdot M_D + M_{SD} + M_L}{f_{ts} - R \cdot f_{ct}}$$

$$= \frac{(1-0.8) \times 66.1953 \cdot 10^7 + (73.5503 \cdot 10^7) + (58.8402 \cdot 10^7)}{3.354 + (0.8 \times 25.65)}$$

$$= 6.0999 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

Untuk perencanaan digunakan modulus penampang yang terbesar, yaitu :

$$= 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

3.3.3 Perhitungan Dimensi Penampang

Untuk menentukan tinggi balok dengan pendekatan menggunakan Persamaan 2.1.

$$h = k \cdot \sqrt{M}$$

$$= 10 \cdot \sqrt{75} \text{ s/d } 15 \cdot \sqrt{75}$$

$$= 86.6025 \text{ cm s/d } 129.9038 \text{ cm}$$

Diambil $h = 120 \text{ cm} = 1200 \text{ mm}$

Untuk balok berbentuk persegi panjang diperoleh :

$$h_f / h = 1.0$$

$$h_w / b = 1.0$$

sedangkan : $A = 1.00 b \cdot h$

$$I = 0.0833 b \cdot h^3$$

$$C_b = 0.500 h$$

$$C^t = 0.500 h$$

$$r^2 = 0.0833 h^2$$

dengan menggunakan persamaan :

$$S^t = \frac{I}{C^t} = \frac{0.0833 \times b \times h^3}{0.500 \times h} = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{I}{C_b} = \frac{0.0833 \times b \times h^3}{0.500 \times h} = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$$

diperoleh hasil $S^t = S_b = 0.1666 \times b \times h^2 \text{ mm}^3$

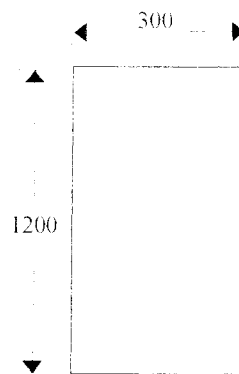
sedangkan modulus rencana yang digunakan adalah : $S_r = 6.7553 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$.

Diketahui bahwa tinggi balok : $h = 1200 \text{ mm}$

untuk $S_r = S^t$, diperoleh :

$$6.7553 \cdot 10^7 = 0.1666 \times b \times 1200^2$$

$$b = 281.4708 \text{ mm} \approx \text{diambil } b = 300 \text{ mm}$$



Gambar 3.2. Dimensi penampang balok bentuk persegi panjang

3.4 Perhitungan Properties Penampang

a. Menentukan letak pusat berat penampang.

$$C^t = 0.500 \times h$$

$$= 600 \text{ mm}$$

maka :

$$\begin{aligned} C'_k &= h - C'' \\ &= 1200 - 600 = 600 \text{ mm} \end{aligned}$$

diperoleh : $C'' = C'_k = 600 \text{ mm}$

b. Luas Tampang (A_c)

$$\begin{aligned} A_c &= b \times h \\ &= 300 \times 1200 = 360000 \text{ mm}^2 = 0.3600 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

c. Momen akibat berat sendiri balok :

$$\begin{aligned} \gamma_{beton} &= 2.5 \text{ t/m}^3 \\ w_D &= A_c \cdot \gamma_{beton} \\ &= 0.3600 \times 2.5 = 0.900 \text{ t/m}^2 < w_D \text{ taksiran } (= 1.35 \text{ t/m}^2) \text{ OK!} \\ M_D &= 1/8 \cdot w_D \cdot l^2 \\ &= 1/8 \times 0.900 \times 20^2 \\ &= 45 \text{ t.m} = 44.1301 \cdot 10^7 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

d. Momen inersia balok :

$$\begin{aligned} I &= 0.0833 \times b \times h^3 \\ &= 0.0833 \times 350 \times 1200^3 = 4.320 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

e. Jari-jari putar balok :

$$\begin{aligned} r^2 &= 0.0833 \times h^2 \\ &= 0.0833 \times 1200^2 = 12.0 \cdot 10^4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

f. Titik pusat balok :

$$k' = 0.167 \times h$$

$$= 0.167 \times 1200 = 200 \text{ mm}$$

$$k_b = 0.167 \times h$$

$$= 0.167 \times 1200 = 200 \text{ mm}$$

diperoleh : $k_b = k' = 183.7 \text{ mm}$

g. Modulus tampang balok :

$$S' = \frac{Ic}{C'}$$

$$= \frac{4.3200 \cdot 10^{10}}{600} = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

$$S_b = \frac{Ic}{C_b}$$

$$= \frac{4.320 \cdot 10^{10}}{600} = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$$

diperoleh : $S' = S_b = 7.200 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

3.5 Perhitungan Gaya Prategang

$$M_D = 44.1301 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$

$$M_T = M_D + M_{SD} + M_L$$

$$= (44.1301 \cdot 10^7) + (73.5503 \cdot 10^7) + (58.8402 \cdot 10^7)$$

$$= 176.5206 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$

$$\frac{M_D}{M_T} = \frac{44.1301 \cdot 10^7}{176.5206 \cdot 10^7} = 0.25 > 0.20$$

Lin & Burns (1993) memberikan persamaan dalam menentukan gaya prategang

efektif dan awal untuk perbandingan $\frac{M_D}{M_T} > 0.20$

$$P_e = \frac{M_T}{0.65 \times h}$$

$$= \frac{176.5206 \cdot 10^7}{0.65 \times 1200} = 2.2630 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Gaya prategang awal setelah kehilangan gaya prategang yang diasumsikan 20 %

$$P_o = \frac{P_e}{1 - 0.20}$$

$$= \frac{2.2630 \cdot 10^6}{0.8} = 2.8288 \cdot 10^6 \text{ N}$$

3.6 Eksentrisitas tendon

Lin & Burns (1993) memberikan persamaan :

$$e - k_b = \frac{M_D}{P_o}$$

$$e = \frac{M_D}{P_o} + k_b = \frac{44.1301 \cdot 10^7}{2.8288 \cdot 10^6} + 200 = 356 \text{ mm}$$

$$d = C_b - e$$

$$= 600 - 356 = 244 \text{ mm}$$

Dengan gaya prategang :

$$P_e = \frac{M_T}{e + k'} = \frac{176.5206 \cdot 10^7}{356 + 200} = 3.1748 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$P_o = \frac{P_e}{1 - 0.2}$$

$$= \frac{3.1748 \cdot 10^6}{0.8} = 3.9685 \cdot 10^6 \text{ N}$$

3.7 Kontrol Luas Penampang

Untuk mengontrol ukuran balok yang dipakai, Lin & Burns (1993) mengajukan persamaan dengan menggunakan luas penampang sebagai kontrol :

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{P_o}{f_{ci}} \cdot \left[1 + \frac{e - (M_D / P_o)}{k'} \right] \leq A_c = 360000 \text{ mm}^2 \\
 &= \frac{3.9685 \cdot 10^6}{25.65} \cdot \left[1 + \frac{356 - (44.101 \cdot 10^7 / 3.9685 \cdot 10^6)}{200} \right] \\
 &= 344094.7368 \text{ mm}^2 < 360000 \text{ mm}^2 \quad \text{OK !}
 \end{aligned}$$

3.8 Perhitungan Tendon

Pada bagian di depan telah dapat diketahui bahwa gaya prategang awal yang terjadi : $P_o = 3.9685 \cdot 10^6$ N. Berdasarkan lampiran 2, digunakan kabel tendon VSL tipe 5-12 dan tipe *strand* ASTM A416-85 *Grade* 270 dengan minimal beban patah : 2204 kN.

Jumlah tendon yang diperlukan :

$$\frac{3.9685 \cdot 10^6}{2.204 \cdot 10^6} = 1.8006 \approx 2.0$$

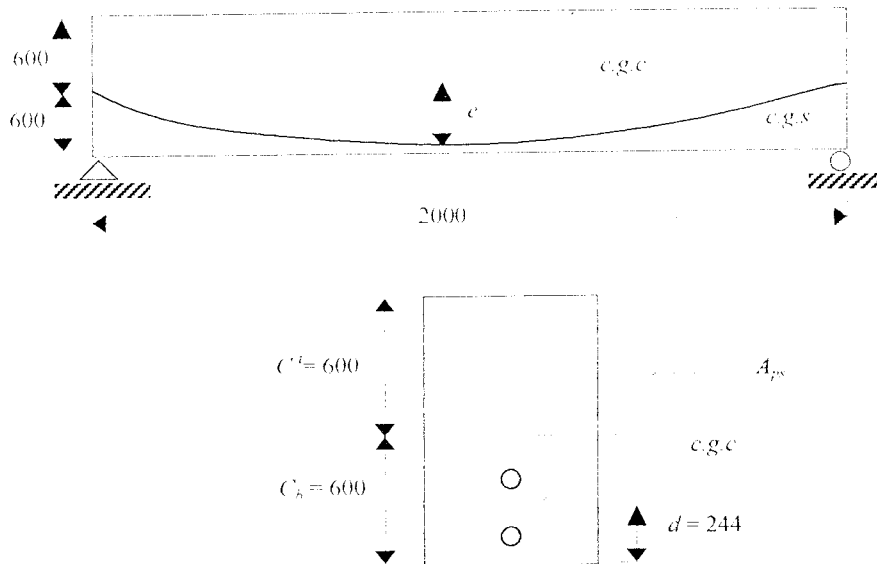
Jadi dipakai 2 buah kabel tendon VSL berisi 12 kabel.

Angkur mati yang digunakan yaitu VSL tipe P dan angkur hidup/ujung VSL tipe Ec dapat dilihat pada lampiran 2.

Data yang diperlukan mengenai kabel tendon adalah sebagai berikut ini.

- a. Diameter satuan kabel : 15.2 mm
- b. Luas satuan kabel : 98.7 mm²
- c. Kuat tarik tendon : 1860 Mpa.

- d. Tegangan leleh kawat : 1670 Mpa.
 e. Diameter internal/eksternal selubung 65/72 mm



Gambar 3.3. Lintasan tendon dan bentuk penampang yang dianalisa

3.9 Perhitungan Sifat Penampang

3.9.1 Saat transfer

Pada saat transfer luas, perhitungan sifat-sifat penampang merupakan sifat penampang netto dari balok.

Luas penampang netto :

$$A_c = 1200 \times 300 = 360000 \text{ mm}^2$$

$$A_{sheath} = 2 \times 1/4 \times \pi \times 72^2 = 8146.2857 \text{ mm}^2$$

$$A_{netto} = 360000 - 8146.2857$$

$$= 351853.7143 \text{ mm}^2 = 3.5183 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Dengan menggunakan luas penampang netto dan sisi bawah sebagai acuan maka diperoleh :

3.9.2 Saat layan

Pada saat layan luas penampang yang digunakan merupakan luas penampang transformasi.

$$n = \frac{E_{ps}}{E_c}$$

$$= \frac{195000}{4730 \cdot \sqrt{45}} = 6.1456$$

$$A_c = 360000 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} = 2 \times 12 \times 98.7$$

$$= 2368.8 \text{ mm}^2$$

Luas transformasi yang tersedia :

$$A_{transf.} = A_c + (n-1) \cdot A_{ps}$$

$$= 360000 + (6.1456 - 1) \times 2368.8$$

$$= 3.7218 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

Dengan menggunakan luas transformasi dan sisi bawah penampang sebagai acuan, maka diperoleh :

$$C_b = \frac{(360000 \times 600) + (2368.8 \times 244)}{3.7218 \cdot 10^5}$$

$$= 581.9032 \text{ mm}$$

sedangkan,

$$C^t = h - C_b$$

$$= 1200 - 581.9032 = 618.0968 \text{ mm}$$

Momen inersia penampang transformasi :

$$\begin{aligned} I_{transf} &= \left(1/12 \times 300 \times 1200^3\right) + \left[(360000) \times (581.9032 - 600)^2\right] \\ &\quad + \left[(6.1456 - 1) \times 2368.8 \times (581.9032 - 244)^2\right] \\ &= 4.4709 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Modulus penampang transformasi :

$$\begin{aligned} S^t &= \frac{I}{C^t} \\ &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{618.0968} = 7.2334 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_b &= \frac{I}{C_b} \\ &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{581.9032} = 7.6833 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Jari-jari putar penampang transformasi :

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{I}{A_{transf.}} \\ &= \frac{4.4709 \cdot 10^{10}}{3.7218 \cdot 10^5} = 13.9172 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

3.10 Kontrol Eksentrisitas Penampang

$$\begin{aligned} f_{pi} &= 75\% \cdot f_{pu} \\ &= 0.75 \times 1860 = 1395 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_i &= A_{ps} \cdot f_{pi} \\ &= 23678.8 \times 1395 = 3.3044 \cdot 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

$$f_{cr} \geq \frac{P_t}{A_{netto}} + \frac{P_t}{I_{netto}} \frac{e(x)}{C'} - \frac{M_D}{I_{netto}} \frac{C'}{C'}$$

$$1.6346 \geq \frac{3.3044 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} + \frac{3.3044 \cdot 10^6 \times e(x) \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$\frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$e(x) \leq 376.0668 \text{ mm}$$

$$e_{ada} = C_b - d$$

$$= 619.5406 - 244 = 375.5406 \text{ mm} < e(x)_{kritis} = 376.0668 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

3.11 Perhitungan Koefisien Rangkak

1. Saat pembebanan luar.

Setelah pemberian gaya prategang, maka pada 1 hari kemudian beban mati dan beban hidup mulai bekerja pada balok beton prategang.

a. Pada umur 1 hari.

$$C_{t(1\text{hari})} = \left(\frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \right) \cdot C_u$$

$$= \left(\frac{1^{0.6}}{10 + 1^{0.6}} \right) \times 2.35 = 0.2136$$

Faktor koreksi yang sangat utama mempengaruhi pada rangkak adalah kelembaban relatif, umur beton terhadap pembebanan setelah masa pengerasan awal dan ketebalan rata-rata unsur .

a. Faktor koreksi kelembaban

Untuk kelembaban 60 %, faktor koreksi dapat dihitung dengan Persamaan (2.30)

dan menghasilkan nilai $K_H = 0.868$

$$f_{ii} \geq \frac{P_i}{A_{netto}} + \frac{P_i \cdot e(x)}{I_{netto}} - \frac{C' \cdot M_{Dv} \cdot C'}{I_{netto}}$$

$$1.6346 \geq \frac{3.3044 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} + \frac{3.3044 \cdot 10^6 \times e(x) \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$\frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 580.4593}{4.2183 \cdot 10^{10}}$$

$$e(x) \leq 376.0668 \text{ mm}$$

$$e_{ada} = C'_b - d$$

$$= 619.5406 - 244 = 375.5406 \text{ mm} < e(x)_{kritis} = 376.0668 \text{ mm} \text{ OK!}$$

3.11 Perhitungan Koefisien Rangkak

1. Saat pembebanan luar.

Setelah pemberian gaya prategang, maka pada 1 hari kemudian beban mati dan beban hidup mulai bekerja pada balok beton prategang.

a. Pada umur 1 hari.

$$C_{t(1hari)} = \left(\frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \right) \cdot C_u$$

$$= \left(\frac{1^{0.6}}{10 + 1^{0.6}} \right) \times 2.35 = 0.2136$$

Faktor koreksi yang sangat utama mempengaruhi pada rangkak adalah kelembaban relatif, umur beton terhadap pembebanan setelah masa pengerasan awal dan ketebalan rata-rata unsur.

a. Faktor koreksi kelembaban

Untuk kelembaban 60 %, faktor koreksi dapat dihitung dengan Persamaan (2.30)

dan menghasilkan nilai $K_{II} = 0.868$

b. Faktor koreksi terhadap umur pembebanan.

Balok dirawat dengan cara *steam cured concrete* dan diberi beban pertama kali pada umur 1 hari dan faktor koreksi ini dapat dihitung dengan Persaman (2.29b) dan menghasilkan nilai $K_{T_0} = 1.13$

c. Faktor koreksi terhadap ketebalan rata-rata unsur.

$$\frac{v}{s} = \frac{360000}{3000} \times \frac{645.2}{1.638 \cdot 10^4} = 4.7267$$

Faktor koreksi terhadap ketebalan rata-rata unnsur ini dapat dihitung dengan Persamaan (2.31) dan menghasilkan nilai $K_T = 0.7418$

Jadi besarnya koefisien rangkak pada saat diberi beban luar adalah :

$$C_{t(1hari)} = 0.2136 \times 0.868 \times 1.13 \times 0.7418 = 0.1558$$

2. Pada akhir umur 5 tahun.

$$C_{t(5tahun)} = \left(\frac{1825^{0.6}}{10 + 1825^{0.6}} \right) \times 2.35$$

$$= 2.1162 \quad \text{mm/mm}$$

$$C_{t(5tahun)} = 2.1162 \times 0.868 \times 1.13 \times 0.7418 = 1.543$$

3.12 Kehilangan Tegangan Tendon

Kehilangan tegangan tendon pada balok beton *post tensioned* antara lain disebabkan oleh :

3.12.1 Akibat Pengangkuran

Diasumsikan bahwa besarnya penggelinciran yang terjadi adalah 3 mm.

Berdasarkan Persamaan (2.43) besarnya kehilangan tegangan adalah :

$$\Delta f_{p-1} = \frac{3,0 \times 195000}{20000} = 29,25 \text{ Mpa.}$$

3.12.2 Akibat Deformasi Elastis Beton

Dari Persamaan (2.47) besarnya kehilangan tegangan yang terjadi adalah :

$$f_{cs} = -\frac{3,3044 \cdot 10^6}{3,5185 \cdot 10^5} \cdot \left(1 + \frac{375,5406^2}{11,9888 \cdot 10^4} \right) + \frac{44,1301 \cdot 10^7 \times 375,5406}{4,2183 \cdot 10^{10}}$$

$$= 16,5106 \text{ Mpa.}$$

$$n = \frac{E_{ps}}{E_{ct}}$$

$$= \frac{195000}{4730 \sqrt{0,95 \times 45}} = 6,3052$$

$$\Delta f_{p-ES} = 16,5106 \times 6,3052 = 104,1026 \text{ Mpa.}$$

Tendon ditarik secara berurutan, sehingga kehilangan tegangan akibat deformasi elastis beton menjadi :

$$\Delta f_{p-ES} = 104,1026 \times 0,5 = 52,0524 \text{ Mpa.}$$

3.12.3 Akibat Gesekan

Untuk mencari nilai α , sebagai pendekatan dapat dilihat pada Gambar 2.14

$$\alpha = \frac{8 \times 375,5406}{20000} = 0,1502$$

Dari Tabel 2.2 digunakan :

$$K = 0,0007$$

$$\mu = 0,20$$

Kehilangan tegangan akibat gesekan dapat dihitung dengan Persamaan (2.48)

$$\Delta f_{p-FR} = 1395 \times [(0,20 \times 0,1502) + (0,0007 \times 20)] = 61,4403 \text{ Mpa}$$

3.12.4 Akibat Rangkak Beton

$$f_{pu} = 1395 - 29.25 - 52.0524 - 61.4403 = 1252.2572 \text{ Mpa}$$

dengan $1252.2572 < 0.7 \cdot f_{pu} = 0.7 \times 1860 = 1320 \text{ Mpa}$ OK!

$$P_i = 1252.2572 \times 2368.8 = 2.9663 \cdot 10^6 \text{ Mpa}$$

$$f_{cs} = -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.7218 \cdot 10^5} + \left(1 + \frac{375.5406^2}{12.0126}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7 \times 375.5406}{4.4709 \cdot 10^{10}}$$

$$= 13.6202 \text{ Mpa}$$

$$f_{csd} = \frac{73.5503 \cdot 10^7 \times 375.5406}{4.4709 \cdot 10^{10}} = 6.1778 \text{ Mpa}$$

Untuk sistem prategang *post tensioned*, nilai $K_{CR} = 1.60$, maka kehilangan tegangan akibat rangkak dapat dihitung dengan Persamaan (2.49)

$$\Delta f_{p-CR} = 6.1456 \times 1.60 \times (13.6203 - 6.1778) = 73.1807 \text{ Mpa}$$

3.12.5 Akibat Susut Beton

Pemberian gaya prategang dilakukan pada 21 hari setelah masa perawatan beton. Dari Tabel 2.3 diperoleh nilai K_{SH} dengan cara interpolasi yaitu sebesar 0.634, maka kehilangan tegangan akibat susut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.53).

$$\Delta f_{p-SH} = 8.2 \cdot 10^6 \times 0.634 \times 195000 \times (1 - 0.06 \times 4.7267) \times (100 - 60)$$

$$= 29.0503 \text{ Mpa}$$

3.12.6 Akibat Relaksasi Baja

$$f_{pi}^* = 0.9 \times 1252.2572 = 1127.0315 \text{ Mpa}$$

$$f_{py} = 1670 \text{ Mpa}$$

Kehilangan tegangan akibat relaksasi dari baja dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.56).

$$\begin{aligned}\Delta f_{p-RR} &= 1127.0315 \times \frac{\log 43800}{10} \cdot \left(\frac{1127.0315}{1670} - 0.55 \right) \\ &= 65.3201 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh total kehilangan tegangan yang terjadi setelah akhir 5 tahun :

$$\begin{aligned}\Delta f_p &= \Delta f_{p-ES} + \Delta f_{p-CR} + \Delta f_{p-SH} + \Delta f_{p-RR} + \Delta f_{p-FR} + \Delta f_{p-AN} \\ &= 310.2939 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Tegangan efektif yang terjadi :

$$f_{pe} = 1252.2572 - 73.1807 - 29.0503 - 65.3201 = 1084.7060 \text{ Mpa}$$

Gaya efektif yang ada :

$$\begin{aligned}P_e &= f_{pe} \cdot A_{ps} \\ &= 1084.7060 \times 2368.8 = 2.5694 \cdot 10^6\end{aligned}$$

Prosentase kehilangan tegangan umur 5 tahun :

$$= \left(\frac{1252.2572 - 1084.7060}{1252.2572} \right) \times 100\% = 13.3799\%$$

3.13 Kontrol Tegangan

Kontrol tegangan diperlukan agar balok yang didesain dapat digunakan dan tidak melampaui batas tegangan yang diijinkan.

1. Saat transfer

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_i}{A_t} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S_t} \leq f_u$$

$$= -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 - \frac{375.5406 \times 580.4593}{11.9888 \cdot 10^4}\right) - \frac{44.1301 \cdot 10^7}{7.2672 \cdot 10^7}$$

$$= 0.8257 \text{ Mpa} < 1.636 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_t}{A_{netto}} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ct}$$

$$= -\frac{2.9663 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 + \frac{375.5406 \times 619.5406}{11.9888 \cdot 10^4}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7}{6.8088 \cdot 10^7}$$

$$= -18.3102 \text{ Mpa} < -25.26 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

2. Saat Layan

a. Pada serat atas :

$$f_t = -\frac{P_e}{A_{netto}} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot C_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S'_{netto}} - \frac{M_{SD} + M_L}{S'_{transf.}} \leq f_{ts}$$

$$= -\frac{2.5694 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 - \frac{375.5406 \times 580.4593}{11.9888 \cdot 10^4}\right) - \frac{44.1301 \cdot 10^7}{7.2672 \cdot 10^7}$$

$$- \frac{(73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7)}{7.2334 \cdot 10^7}$$

$$= 18.3997 \text{ Mpa} < -20.25 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

b. Pada serat bawah :

$$f_b = -\frac{P_e}{A_{netto}} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot C_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S_{b(netto)}} + \frac{M_{SD} + M_L}{S_{b(transf.)}} \leq f_{ts}$$

$$= -\frac{2.5694 \cdot 10^6}{3.5185 \cdot 10^5} \times \left(1 + \frac{375.5406 \times 619.5406}{11.9888 \cdot 10^4}\right) + \frac{44.1301 \cdot 10^7}{6.8088 \cdot 10^7}$$

$$+ \frac{(73.5503 \cdot 10^7 + 58.8402 \cdot 10^7)}{7.6833 \cdot 10^7}$$

$$= 2.2377 \text{ Mpa} < 3.354 \text{ Mpa} \quad \text{OK !}$$

3.14 Analisa Lendutan

Perhitungan lendutan pada balok beton prategang dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2.26). Persamaan tersebut dibagi menjadi beberapa bagian persamaan lendutan akibat gaya prategang, berat sendiri maupun beban mati dan beban hidup yang bekerja pada satuan waktu yang akan dianalisa.

1. Bagian (1), lendutan mula akibat dari gaya prategang.

Pada kasus ini bentuk lintasan kabel berupa parabola seperti terlihat pada Gambar 3.3. Persamaan untuk menghitung lendutannya diberikan oleh Persamaan (2.21):

$$\begin{aligned}\delta_{P_i} &= \frac{5 \cdot P_i \cdot e \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I_{netto}} \\ &= \frac{5 \times 2.9663 \cdot 10^6 \times 375.5406 \times 20000^2}{48 \times 30926.388 \times 4.2183 \cdot 10^{10}} \\ &= 35.5793 \text{ mm } (\uparrow)\end{aligned}$$

2. Bagian (2), lendutan mula akibat beban mati balok. Untuk menghitung besar lendutan ini diberikan Persamaan (2.23).

$$\begin{aligned}\delta_D &= \frac{5 \cdot M_D \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_{netto}} \\ &= \frac{5 \times 44.1301 \cdot 10^7 \times 20000^2}{48 \times 31729.786 \times 4.2183 \cdot 10^{10}} \\ &= 14.0946 \text{ mm } (\downarrow)\end{aligned}$$

3. Bagian (3), lendutan akibat rangkai dari balok beton yang diakibatkan oleh gaya prategang.

$$\delta'_{pi} = \left[-\frac{\Delta P}{P_i} + (k_r \cdot C_i) \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_i} \right) \right] \cdot \delta_{pi}$$

$$k_r = 1.0$$

$$C_i = 1.5434$$

$$\frac{\Delta P}{P_i} = \frac{(310.2939 - 52.0524) \times 2368.8}{3.3044 \cdot 10^6} = 0.20622$$

$$1 - \frac{\Delta P}{2 \cdot P_i} = 1 - \left(\frac{0.2062}{2} \right) = 0.8968$$

Lendutan yang terjadi :

$$\delta'_{pi} = [-0.2062 + (1.0 \times 1.5434 \times 0.8968)] \times 35.5793 = 41.9141 \text{ mm } (\uparrow)$$

4. Bagian (4), lendutan akibat rangkai dari balok beton akibat berat sendiri balok.

$$\delta_{D'} = (k_r \cdot C_i) \cdot \delta_{D'}$$

$$= 1.0 \times 1.5434 \times 14.0946 = 21.6025 \text{ mm } (\downarrow)$$

5. Bagian (5), lendutan mula dari balok beton akibat beban mati.

$$\delta_{SD} = \frac{5}{48} \frac{M_{SD}}{E_C} \frac{L^2}{I_{transf.}}$$

$$= 21.6025 \text{ mm } (\downarrow)$$

6. Bagian (6), lendutan akibat rangkai dari balok beton, yang disebabkan oleh beban mati .

$$\delta_{SD'} = (k \cdot C_i \cdot \beta_s) \cdot \delta_{SD}$$

Untuk mendapatkan nilai β_s , dimana beban mati mulai bekerja pada saat 1 hari setelah pemberian gaya prategang, sehingga diperoleh nilai :

$$\beta_s = 1.13 \times 1^{-0.1995} = 1.13$$

Lendutan yang terjadi :

$$\delta_{SD'} = 1.0 \times 1.5434 \cdot 1.13 \cdot 21.6025 = 37.6759 \text{ mm } (\downarrow)$$

7. Bagian (7), lendutan dari balok beton akibat beban hidup.

$$\begin{aligned} \delta_L &= \frac{5 \cdot M_L \cdot L^2}{48 \cdot E_c \cdot I_{transf.}} \\ &= \frac{5 \times 58.8402 \cdot 10^7 \times 20000^2}{31729.786 \times 4.4709 \cdot 10^{10}} = 17.2820 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

Lendutan sesaat yang merupakan lendutan akibat berat sendiri balok ke atas dilawan oleh *camber* (lendutan ke atas) yang disebabkan oleh gaya prategang dan terjadi sebelum beban luar bekerja. Besar lendutan sesaat ini adalah :

$$\delta_{T(0\text{tahun})} = 35.5793 - 14.0946 = 21.4847 \text{ mm } (\uparrow)$$

Sedangkan lendutan yang terjadi pada akhir umur 5 tahun adalah :

$$\begin{aligned} \delta_{T(5\text{tahun})} &= 35.5793 - 14.0946 + 41.9141 - 21.7538 - 21.6025 \\ &\quad - 37.6759 - 17.2820 \\ &= 34.9155 \text{ mm } (\downarrow) \end{aligned}$$

Hasil analisa lendutan pada bentuk penampang persegi panjang di atas dapat di tabelkan menurut bagiannya masing masing sebagai berikut ini.

Tabel 3.1 Hasil analisa lendutan umur 5 tahun penampang persegi panjang..

| Lendutan / <i>camber</i> akibat gaya-gaya yang bekerja. | Besarnya lendutan / <i>camber</i> (mm) |
|--|--|
| <i>Camber</i> akibat gaya prategang. | 35.5793 |
| Lendutan akibat berat sendiri balok. | -14.0946 |
| <i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang. | 41.9141 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok. | -21.7538 |
| Lendutan dari balok di bawah beban mati. | -21.6025 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati. | -37.6759 |
| Lendutan akibat beban hidup | -17.2830 |
| Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$) | -34.9155 |

3.15 Kontrol Lendutan

Dari Tabel 2.5 diperoleh batasan persyaratan lendutan maksimum yang diijinkan terhadap pemakaian balok.

$$\frac{l}{180} = \frac{20000}{180} = 111.1111 \text{ mm} \gg 17.2820 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{240} = \frac{20000}{240} = 83.3333 \text{ mm} \gg 17.2820 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{360} = \frac{20000}{360} = 55.5556 \text{ mm} > 34.9155 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

$$\frac{l}{480} = \frac{20000}{480} = 41.6667 \text{ mm} > 34.9155 \text{ mm} \quad \text{OK!}$$

Jadi balok tampang persegi panjang yang didesain untuk menahan beban-beban yang terjadi untuk umur layan 5 tahun masih aman.

Dari analisa lendutan balok beton prategang penampang persegi-panjang pada contoh perhitungan merupakan lendutan *ultimate* yang terjadi setelah umur 5 tahun setelah pemberian gaya prategang yang besarnya adalah -34.9155 mm. Dengan cara yang sama untuk balok tampang T tunggal dan I simetris hasil analisa lendutannya untuk umur layan 5 tahun seperti pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.2. Hasil analisa lendutan umur 5 tahun balok tampang T tunggal

| Lendutan / camber akibat gaya-gaya yang bekerja. | Besarnya lendutan / camber (mm) |
|--|--|
| <i>Camber</i> akibat gaya prategang. | 37.7020 |
| Lendutan akibat berat sendiri balok. | -12.6764 |
| <i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang. | 47.7734 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok. | -21.3248 |
| Lendutan dari balok di bawah beban mati. | -20.60504 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati. | -39.1687 |
| Lendutan akibat beban hidup | -16.4840 |
| Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$) | -24.7835 |

Tabel 3.3. Hasil analisa lendutan umur 5 tahun penampang I simetris

| Lendutan / <i>camber</i> akibat gaya-gaya yang bekerja. | Besarnya Lendutan / <i>camber</i> (mm) |
|--|---|
| <i>Camber</i> akibat gaya prategang. | 35.9611 |
| Lendutan akibat berat sendiri balok. | -12.6674 |
| <i>Camber</i> akibat rangkai dari balok disebabkan gaya prategang. | 45.6217 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok disebabkan berat sendiri balok. | -21.1861 |
| Lendutan dari balok di bawah beban mati. | -21.0872 |
| Lendutan akibat rangkai dari balok di bawah beban mati. | -39.8361 |
| Lendutan akibat beban hidup | -16.8626 |
| Lendutan <i>ultimate</i> ($\Sigma\delta$) | -30.0487 |

Sedangkan untuk variasi waktu lama pembebanan, hasil analisa lendutan yang terjadi pada balok tampang persegi panjang, T tunggal dan I simetris ditampilkan dalam bentuk tabel, yaitu seperti terlihat pada Tabel 3.4, Tabel 3.5 dan Tabel 3.6.berikut ini.

Tabel 3.4 Hasil analisa lendutan balok tampang persegi panjang terhadap variasi lama pembebanan

| Lama Pembebanan | Bagian | | | | | | | $d_{ultimate}$ (mm) |
|--------------------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | - | - | - | - | - | 21,4847 |
| 1 Hari | 35,5793 | -14,0947 | -0,9596 | -2,1961 | -21,6025 | -3,8035 | -17,2820 | -24,3590 |
| 1 Minggu | 35,5793 | -14,0947 | 7,1332 | -5,8758 | -21,6025 | -10,1764 | -17,2820 | -26,3188 |
| 1 Bulan | 35,5793 | -14,0947 | 17,4279 | -10,5060 | -21,6025 | -18,1956 | -17,2820 | -28,6735 |
| 0.5 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 31,2869 | -16,7782 | -21,6025 | -29,0585 | -17,2820 | -31,9496 |
| 1 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 35,5200 | -18,7241 | -21,6025 | -32,4288 | -17,2820 | -33,0328 |
| 2 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 38,8410 | -20,2756 | -21,6025 | -35,1159 | -17,2820 | -33,9503 |
| 3 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 40,3723 | -21,0044 | -21,6025 | -36,3780 | -17,2820 | -34,4101 |
| 4 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 41,2903 | -21,4482 | -21,6025 | -37,1466 | -17,2820 | -34,7043 |
| 5 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 41,9142 | -21,7538 | -21,6025 | -37,6760 | -17,2820 | -34,9155 |
| 6 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 42,3708 | -21,9804 | -21,6025 | -38,0684 | -17,2820 | -35,0779 |
| 8 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 43,0021 | -22,2989 | -21,6025 | -38,6201 | -17,2820 | -35,3168 |
| 10 Tahun | 35,5793 | -14,0947 | 43,4231 | -22,5159 | -21,6025 | -38,9959 | -17,2820 | -35,4886 |

Tabel 3.5 Hasil analisa lendutan balok tampang T tunggal terhadap lama pembebanan

| Lama Pembebanan | Bagian | | | | | | | $d_{ultimate}$ (mm) |
|--------------------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | - | - | - | - | - | 25,0256 |
| 1 Hari | 37,7021 | -12,6765 | -1,4077 | -2,1528 | -20,6050 | -3,9542 | -16,4840 | -19,5781 |
| 1 Minggu | 37,7021 | -12,6765 | 7,8824 | -5,7599 | -20,6050 | -10,5796 | -16,4840 | -20,5205 |
| 1 Bulan | 37,7021 | -12,6765 | 19,6781 | -10,2988 | -20,6050 | -18,9165 | -16,4840 | -21,6007 |
| 0.5 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 35,5600 | -16,4473 | -20,6050 | -30,2098 | -16,4840 | -23,1605 |
| 1 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 40,4169 | -18,3549 | -20,6050 | -33,7137 | -16,4840 | -23,7151 |
| 2 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 44,2329 | -19,8758 | -20,6050 | -36,5072 | -16,4840 | -24,2136 |
| 3 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 45,9953 | -20,5902 | -20,6050 | -37,8194 | -16,4840 | -24,4778 |
| 4 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 47,0535 | -21,0252 | -20,6050 | -38,6184 | -16,4840 | -24,6535 |
| 5 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 47,7735 | -21,3249 | -20,6050 | -39,1688 | -16,4840 | -24,7836 |
| 6 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 48,3012 | -21,5470 | -20,6050 | -39,5767 | -16,4840 | -24,8860 |
| 8 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 49,0319 | -21,8592 | -20,6050 | -40,1502 | -16,4840 | -25,0410 |
| 10 Tahun | 37,7021 | -12,6765 | 49,5203 | -22,0719 | -20,6050 | -40,5410 | -16,4840 | -25,1561 |

Tabel 3.6 Hasil analisa lendutan balok tampang I simetris terhadap variasi lama pembeban

| Lama Pembebanan | Bagian | | | | | | | $d_{ultimate}$ (mm) |
|--------------------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | - | - | - | - | - | 23,2937 |
| 1 Hari | 35,9612 | -12,6674 | -1,1195 | -2,1388 | -21,0783 | -4,0215 | -16,8626 | -21,9270 |
| 1 Minggu | 35,9612 | -12,6674 | -2,1388 | -5,7224 | -21,0783 | -10,7598 | -16,8626 | -23,4194 |
| 1 Bulan | 35,9612 | -12,6674 | 18,9248 | -10,2318 | -21,0783 | -19,2388 | -16,8626 | -25,1930 |
| 0.5 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 34,0223 | -16,3403 | -21,0783 | -30,7246 | -16,8626 | -27,6899 |
| 1 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 38,6373 | -18,2356 | -21,0783 | -34,2881 | -16,8626 | -28,5335 |
| 2 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 42,2617 | -19,7466 | -21,0783 | -37,1292 | -16,8626 | -29,2614 |
| 3 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 43,9347 | -20,4563 | -21,0783 | -38,4638 | -16,8626 | 29,6327 |
| 4 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 44,9388 | -21,0252 | -21,0783 | -39,2764 | -16,8626 | -29,8733 |
| 5 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 45,6217 | -21,1862 | -21,0783 | -39,8362 | -16,8626 | -30,0478 |
| 6 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 46,1220 | -21,4069 | -21,0783 | -40,2511 | -16,8626 | -30,1831 |
| 8 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 46,8146 | -21,7171 | -21,0783 | -40,8344 | -16,8626 | -30,3841 |
| 10 Tahun | 35,9612 | -12,6674 | 47,2771 | -21,9284 | -21,0783 | -41,2318 | -16,8626 | -30,5303 |

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Umum

Beberapa hal dapat diperoleh dari perhitungan analisa tampang balok beton prategang *post tensioned*, terutama mengenai kapasitas tampang elemen struktur terhadap kekuatan lentur. Kapasitas tampang elemen struktur dapat diketahui dengan pasti, sehingga meyakinkan akan ketepatan hasil rancangan. Hal tersebut bisa dijadikan referensi dalam desain struktur terhadap kekuatan lentur yang serupa, dengan demikian dalam perencanaan selanjutnya bisa mendapatkan hasil yang diharapkan dengan penampang yang lebih ekonomis.

Dalam analisis kapasitas penampang yang mampu menahan lentur ini dapat diketahui besarnya tegangan yang terjadi pada tahap-tahap tertentu, yaitu : pada tahap penarikan (transfer) dan pada tahap beban layan telah bekerja. Kapasitas penampang pada tahap transfer berupa penampang netto sedangkan pada tahap beban layan telah bekerja berupa penampang transformasi yang selanjutnya digunakan untuk pemeriksaan tegangan pada saat transfer dan beban layan telah bekerja.

Kekuatan lentur suatu penampang balok beton prategang tergantung dari beberapa parameter yaitu jumlah tulangan prategang, dimensi penampang,

Tabel 4.1. Hasil analisa balok tampang persegi panjang

| Lama Pembebanan | Tegangan Efektif Tendon (Mpa) | Kehilangan Tegangan (%) | Tegangan Beton (Mpa) | | Faktor Koreksi Rangkak Beton | Besarnya Lendutan (mm) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|
| | | | Serat Atas | Serat Bawah | | |
| 0 Tahun | 1252.2573 | 0.0000 | 0.8258 | -18.3102 | 0.0000 | 21.4847 |
| 1 Hari | 1130.6022 | 9.7149 | -18.1470 | 1.3291 | 0.1558 | -24.3590 |
| 1 Minggu | 1118.7091 | 10.6646 | -18.2125 | 1.5645 | 0.4169 | -26.3188 |
| 1 Bulan | 1109.8145 | 11.3749 | -18.2615 | 1.7406 | 0.7454 | -28.6735 |
| 0.5 Tahun | 1098.7792 | 12.2561 | -18.3223 | 1.9591 | 1.1904 | -31.9496 |
| 1 Tahun | 1094.5427 | 12.5944 | -18.3456 | 2.0430 | 1.3285 | -33.0328 |
| 2 Tahun | 1090.3063 | 12.9327 | -18.3689 | 2.1268 | 1.4385 | -33.9503 |
| 3 Tahun | 1087.8281 | 13.1306 | -18.3826 | 2.1759 | 1.4902 | -34.4101 |
| 4 Tahun | 1086.0698 | 13.2710 | -18.3923 | 2.2107 | 1.5217 | -34.7043 |
| 5 Tahun | 1084.7060 | 13.3799 | -18.3998 | 2.2377 | 1.5434 | -34.9155 |
| 6 Tahun | 1083.5916 | 13.4690 | -18.4059 | 2.2598 | 1.5595 | -35.0779 |
| 8 Tahun | 1081.8334 | 13.6093 | -18.4156 | 2.2946 | 1.5821 | -35.3168 |
| 10 Tahun | 1080.4696 | 13.7182 | -18.4231 | 2.3216 | 1.5975 | -35.4886 |

Tabel 4.2 Hasil analisa balok tampang T tunggal

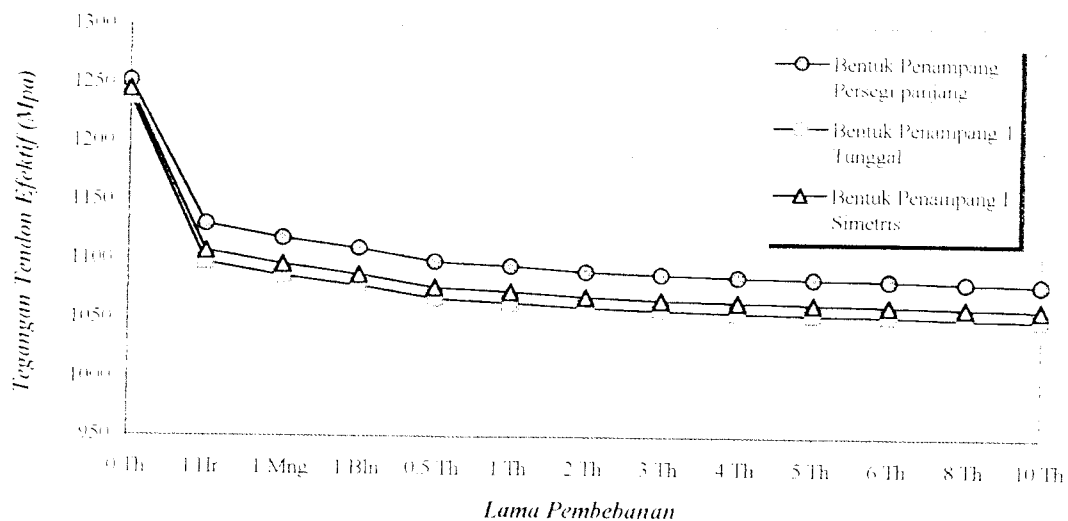
| Lama Pembebanan | Tegangan Efektif Tendon (Mpa) | Kehilangan Tegangan (%) | Tegangan Beton (Mpa) | | Faktor Koreks Rangkak Beton | Besarnya Lendutan (mm) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|
| | | | Serat Atas | Serat Bawah | | |
| 0 Tahun | 1238.7627 | 0.0000 | 0.7199 | -21.5699 | 0.0000 | 25.0256 |
| 1 Hari | 1097.5916 | 11.3961 | -15.8677 | -0.4380 | 0.1698 | -19.5781 |
| 1 Minggu | 1086.5118 | 12.2906 | -15.9180 | -0.1879 | 0.4544 | -20.5205 |
| 1 Bulan | 1078.2255 | 12.7955 | -15.9556 | -0.0009 | 0.8124 | -21.6007 |
| 0.5 Tahun | 1067.9449 | 12.9595 | -16.0022 | 0.2312 | 1.2975 | -23.1605 |
| 1 Tahun | 1063.9982 | 14.1080 | -16.0201 | 0.3203 | 1.4480 | -23.7151 |
| 2 Tahun | 1060.0515 | 14.4266 | -16.0380 | 0.4094 | 1.5679 | -24.2136 |
| 3 Tahun | 1057.7428 | 14.6130 | -16.0485 | 0.4615 | 1.6243 | -24.4778 |
| 4 tahun | 1056.1048 | 14.7452 | -16.0559 | 0.4985 | 1.6586 | -24.6535 |
| 5 Tahun | 1054.8342 | 14.8478 | -16.0616 | 0.5271 | 1.6822 | -24.7836 |
| 6 Tahun | 1053.7961 | 14.9316 | -16.0664 | 0.5506 | 1.6998 | -24.8860 |
| 8 Tahun | 1052.1581 | 15.0638 | -16.0738 | 0.5875 | 1.7244 | -25.0410 |
| 10 Tahun | 1050.8875 | 15.1664 | -16.0795 | 0.6162 | 1.7412 | -25.1561 |

Tabel 4.3 Hasil analisa balok tampang I simetris

| Lama Pembebanan | Tegangan Efektif Tendon (Mpa) | Kehilangan Tegangan (%) | Tegangan Beton (Mpa) | | Faktor Koreksi Rangkak Beton | Besarnya Lendutan (mm) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|
| | | | Serat Atas | Serat Bawah | | |
| 0 Tahun | 1245.7670 | 0 | 0.8510 | -19.6848 | 0 | 23.0563 |
| 1 Hari | 1109.6109 | 10.9295 | -17.6541 | -0.2029 | 0.1681 | -21.9233 |
| 1 Minggu | 1098.1107 | 11.8526 | -17.7125 | 0.0329 | 0.4496 | -23.4340 |
| 1 Bulan | 1089.5101 | 12.5430 | -17.7561 | 0.2093 | 0.8040 | -25.2306 |
| 0.5 Tahun | 1078.8395 | 13.3996 | -17.8103 | 0.4281 | 1.2840 | -27.7578 |
| 1 Tahun | 1074.7431 | 13.7284 | -17.8311 | 0.5121 | 1.4329 | -28.6105 |
| 2 Tahun | 1070.6466 | 14.0572 | -17.8519 | 0.5961 | 1.5516 | -29.3453 |
| 3 Tahun | 1068.2504 | 14.2496 | -17.8640 | 0.6453 | 1.6074 | -29.7197 |
| 4 tahun | 1066.5502 | 14.3861 | -17.8726 | 0.6801 | 1.6413 | -29.9622 |
| 5 Tahun | 1065.2315 | 14.4919 | -17.8793 | 0.7072 | 1.6647 | -30.1379 |
| 6 Tahun | 1064.1540 | 14.5784 | -17.8848 | 0.7293 | 1.6821 | -30.2741 |
| 8 Tahun | 1062.4538 | 14.7149 | -17.8934 | 0.7641 | 1.7064 | -30.4762 |
| 10 Tahun | 1061.1350 | 14.8208 | -17.9001 | 0.7912 | 1.7230 | -30.6232 |

4.2 Tegangan tendon efektif

Tegangan tendon efektif merupakan tegangan tendon yang terjadi setelah beban layan telah bekerja dan telah mengalami reduksi tegangan akibat kehilangan tegangan-tegangan berupa kehilangan tegangan akibat rangkakan beton, susut beton, dan relaksasi dari baja tendon prategang. Nilai tegangan tendon efektif yang terjadi terhadap pengaruh lamanya pembebanan pada balok beton prategang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Pada 1 tahun setelah beban kerja bekerja, nilai tegangan tendon efektif menunjukkan penurunan sebesar 3.18 % untuk balok persegi panjang, 3.06 % untuk balok tampang T tunggal, dan 3.13 % untuk balok tampang I simetris. Sedangkan pada tahun-tahun berikutnya penurunan tegangan tendon efektif semakin berkurang seperti terlihat pada Gambar 4.1 berikut ini.



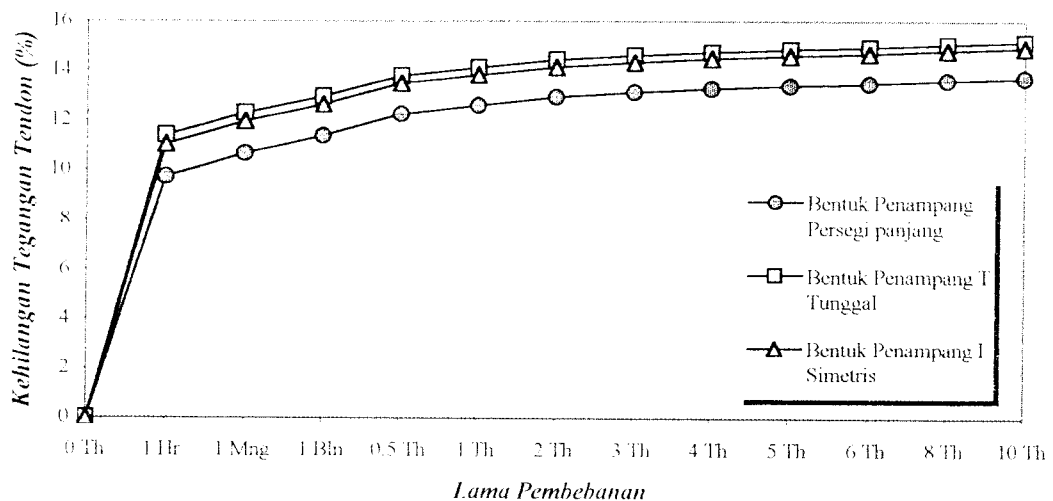
Gambar 4.1 Tegangan tendon efektif terhadap lama pembebanan

Balok tampang persegi panjang menghasilkan nilai tegangan tendon efektif yang paling besar di antara bentuk penampang lainnya. Hal ini disebabkan karena tampang balok persegi panjang mempunyai kehilangan tegangan tendon yang paling kecil di antara bentuk tampang T tunggal maupun I simetris. Pada balok tampang T tunggal, tegangan tendon efektif lebih kecil dari balok tampang I simetris karena balok tampang T tunggal memiliki kehilangan tegangan tendon yang lebih besar dari balok tampang I simetris.

4.3 Prosentase Kehilangan Tegangan Tendon

Kehilangan tegangan tendon yang terjadi pada penampang balok persegi panjang, T tunggal, dan I simetris disebabkan karena beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut adalah pengankuran tendon, gesekan tendon dan balok beton, deformasi elastik beton, rangkai beton, susut beton, dan relaksasi baja tendon prategang. Prosentase kehilangan tegangan tendon yang diakibatkan oleh faktor-faktor tersebut menunjukkan peningkatan terhadap penambahan waktu

pembebanan. Peningkatan tersebut dapat terlihat secara jelas pada 1 tahun setelah beban layan bekerja, yaitu sebesar 22.66 % untuk balok tampang persegi panjang, 19.22 % untuk balok tampang T tunggal, dan 20.20 % untuk balok tampang I simetris. Pada tahun-tahun berikutnya peningkatan prosentase kehilangan tegangan tendon mulai berkurang, seperti terlihat pada Gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2. Prosentase kehilangan tegangan tendon terhadap lama pembebanan

Pada Gambar 4.2 di atas memperlihatkan bahwa balok tampang persegi panjang mempunyai prosentase kehilangan tegangan tendon yang paling kecil di antara kedua bentuk penampang balok yang lain. Hal ini disebabkan karena balok tampang persegi panjang mempunyai luas penampang yang lebih besar, jarak eksentrisitas tendon yang lebih kecil dan rasio luas-keliling yang lebih besar sehingga menghasilkan kehilangan tegangan tendon akibat deformasi elastik beton, rangkai beton, dan susut beton yang kecil. Sedangkan pada balok tampang T tunggal dimana prosentase kehilangan tegangan tendon lebih kecil dari balok tampang I simetris, mempunyai jarak eksentrisitas tendon lebih besar, dan rasio luas-keliling balok yang lebih kecil daripada balok tampang I simetris.

4.4 Tegangan Beton

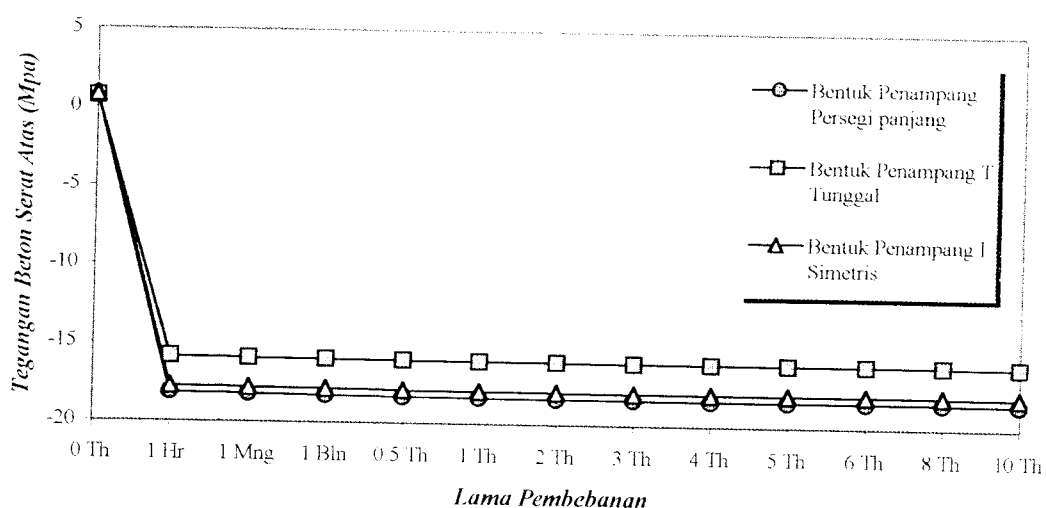
Tegangan yang terjadi pada penampang balok beton prategang menghasilkan tegangan di serat atas dan serat bawah balok. Tegangan-tegangan beton tersebut dianalisis pada saat transfer dan saat beban layan bekerja.

1. Serat Atas

Tegangan beton serat atas penampang balok persegi panjang, T tunggal, dan I simetris pada saat transfer merupakan tegangan tarik. Sesaat setelah beban layan bekerja, maka tegangan serat atas beton berubah menjadi tegangan desak. Nilai tegangan desak beton tersebut semakin meningkat seiring dengan bertambahnya umur layan balok beton. Pada 1 tahun setelah pembebanan peningkatan tegangan desak beton yang terjadi menunjukkan kenaikan sebesar 1.08 % untuk balok tampang persegi panjang, 0.95 % untuk balok tampang T tunggal, dan 0.98 % untuk balok tampang I simetris. Sedangkan pada tahun-tahun berikutnya kenaikan tersebut semakin berkurang, seperti terlihat pada Gambar 4.3.

Dari Gambar 4.3 tersebut memperlihatkan bahwa tegangan beton pada saat transfer, balok T tunggal mempunyai nilai tegangan desak beton yang paling kecil di antara balok tampang persegi panjang maupun I simetris. Sedangkan balok tampang I simetris terjadi tegangan tarik beton pada serat atas lebih besar dari balok tampang persegi panjang. Hal ini disebabkan karena balok tampang T tunggal mempunyai momen inersi netto yang lebih besar dan jarak titik berat penampang balok yang lebih kecil, sedangkan pada balok tampang I simetris mempunyai luas penampang balok lebih kecil dibanding dengan balok tampang persegi panjang.

Demikian juga pada akhir umur layan, balok tampang T tunggal mempunyai tegangan desak beton yang paling kecil di antara bentuk penampang lainnya. Sedangkan balok tampang persegi panjang nilai tegangan desak beton lebih besar dari balok tampang I simetris. Hal ini disebabkan karena balok T tunggal mempunyai momen inersia netto yang paling besar di antara bentuk penampang lainnya, sedangkan balok persegi panjang mempunyai momen inersia netto dan transformasi yang lebih kecil dibanding dengan balok tampang I simetris.

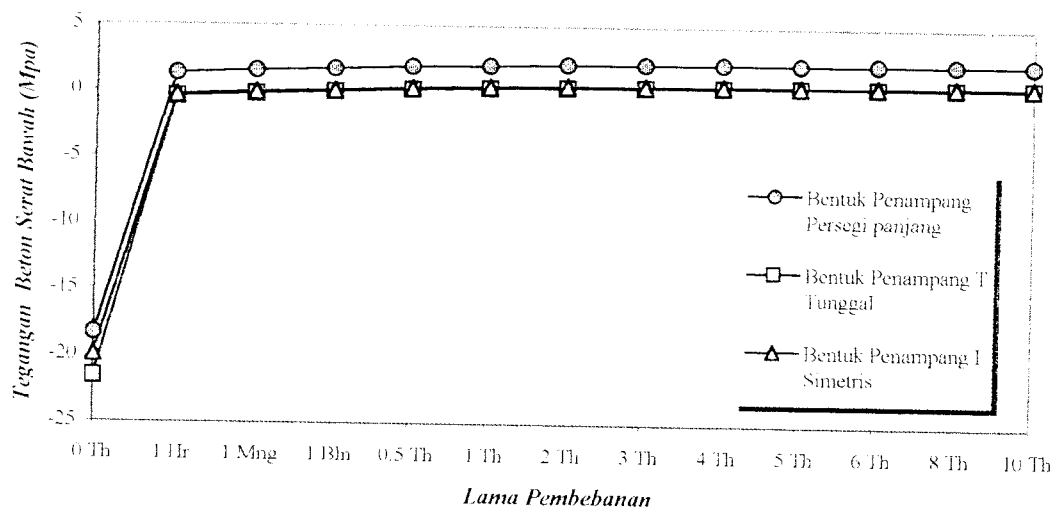


Gambar 4.3. Tegangan beton serat atas terhadap lama pembebanan

2. Tegangan Serat Bawah

Tegangan beton awal atau saat transfer yang terjadi pada serat bawah penampang balok persegi panjang, T tunggal, dan I simetris menghasilkan tegangan berupa tegangan desak. Setelah pemberian beban kerja, pada balok tampang persegi panjang menunjukkan terjadinya tegangan tarik tetapi balok tampang T tunggal maupun I simetris tegangan beton yang terjadi masih berupa tegangan desak. Hal ini disebabkan karena pada balok tampang T tunggal dan I

simetris setelah beban layan bekerja, tegangan desak beton yang terjadi masih bisa ditahan oleh sayap penampang balok. Nilai tegangan desak beton pada penampang balok persegi panjang, T tunggal, dan I simetris menunjukkan peningkatan terhadap lama pembebanan. Pada 1 tahun setelah beban layan bekerja peningkatan yang terjadi pada balok tampang persegi panjang sebesar 34.94 %, sedangkan balok tampang T tunggal dan I simetris lebih dari 100 %. Pada tahun-tahun berikutnya peningkatan tegangan beton tersebut semakin berkurang, seperti terlihat pada Gambar 4.4. berikut ini.



Gambar 4.4. Tegangan beton serat bawah terhadap lama pembebanan

Dari Gambar 4.4 terdapat nilai tegangan desak beton pada serat bawah balok tampang persegi panjang saat transfer paling kecil di antara bentuk penampang lainnya, sedangkan balok tampang T tunggal lebih besar dibanding balok tampang I simetris. Tetapi pada akhir layan umur 1 tahun nilai tegangan tarik beton balok tampang T tunggal paling kecil di antara bentuk penampang yang lain, sedangkan balok tampang persegi panjang mempunyai nilai tegangan

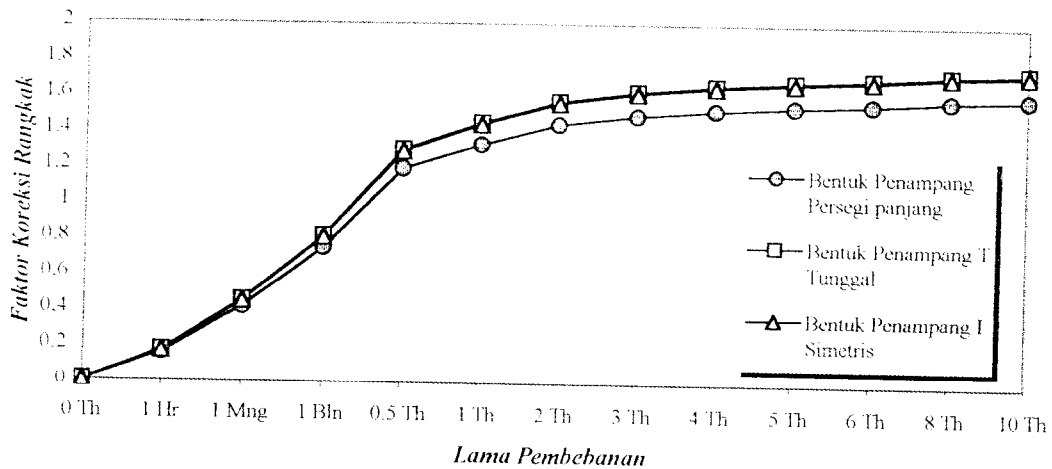
tarik beton yang lebih besar dibanding dengan balok tampang I simetris. Hal ini disebabkan karena pada saat transfer balok persegi panjang mempunyai luas penampang yang paling besar, jarak pusat berat terhadap sisi bawah penampang dan jarak eksentrisitas tendon serta momen inersia yang paling kecil di antara bentuk penampang lainnya. Sedangkan balok tampang T tunggal mempunyai momen inersia, jarak pusat berat penampang terhadap sisi bawah penampang dan jarak eksentrisitas tendon yang lebih besar dari balok tampang I simetris. Pada akhir umur layan balok tampang T tunggal mempunyai gaya prategang efektif tendon yang paling kecil dan momen inersia netto maupun transformasi paling besar di antara bentuk penampang lainnya yang mempengaruhi terjadinya tegangan beton pada serat bawah penampang balok.

4.5 Faktor Koefisien Rangkak

Nilai faktor koreksi rangkak beton dipengaruhi oleh kelembaban relatif rata-rata, umur pembebanan balok beton, dan rasio antara luas-keliling penampang balok beton prategang. Nilai faktor koreksi rangkak terhadap lama pembebanan menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu. Peningkatan yang besar terjadi pada umur 1 tahun setelah beban layan bekerja, yaitu sebesar 88.27 % untuk balok tampang persegi panjang, T tunggal, maupun I simetris. Pada tahun-tahun berikutnya peningkatan tersebut semakin berkurang seperti terlihat pada Gambar 4.5.

Nilai faktor koreksi rangkak beton dari Gambar 4.5 terlihat bahwa balok tampang T tunggal lebih besar dari balok tampang persegi panjang, dan I simetris. Sedangkan nilai faktor koreksi rangkak beton pada balok tampang persegi panjang

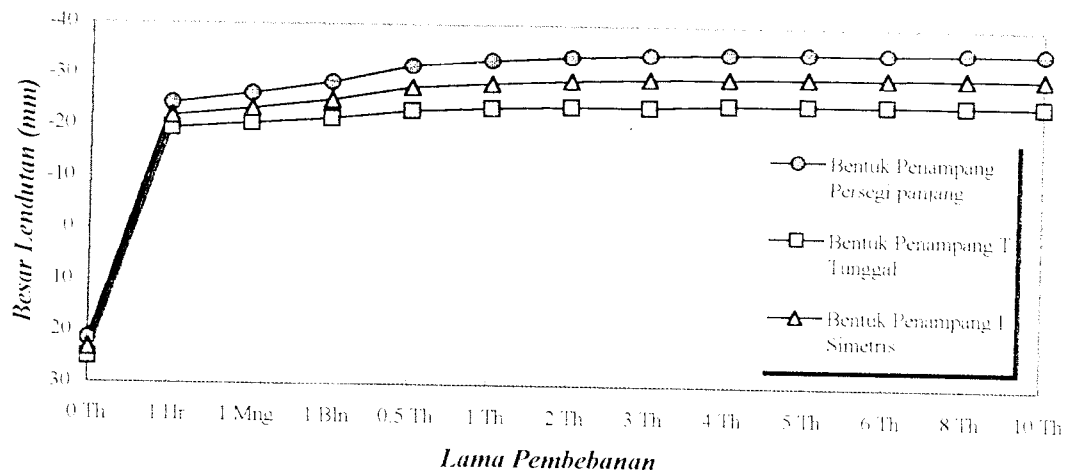
lebih kecil dari balok tampang I simetris. Hal ini disebabkan karena balok tampang T tunggal mempunyai rasio antara luas dan keliling yang paling besar di antara balok tampang persegi panjang maupun I simetris. Sedangkan pada balok tampang persegi panjang mempunyai rasio antara luas dan keliling yang lebih kecil dari balok tampang I simetris.



Gambar 4.5. Faktor koreksi rangkak terhadap lama pembebanan

4.6 Lendutan

Lendutan yang terjadi pada penampang balok beton prategang terdiri dari lendutan sesaat, yaitu sebelum beban layan bekerja dan lendutan akhir yang terjadi setelah beban layan bekerja. Besarnya lendutan yang terjadi pada balok tampang persegi panjang, T tunggal, dan I simetris terhadap waktu lama pembebanan menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu. Peningkatan yang besar terjadi pada umur 1 tahun setelah beban layan bekerja. Besarnya peningkatan tersebut pada balok persegi panjang 26.25 %, balok tampang T tunggal 17.44 %, dan balok tampang I simetris 23 %. Kemudian pada tahun-tahun berikutnya peningkatannya terus semakin berkurang seperti terlihat pada Gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.6. Besar lendutan terhadap lama pembebanan

Pada Gambar 4.6 di atas memperlihatkan bahwa bahwa tampang T tunggal mempunyai besar lendutan yang paling kecil di antara bentuk penampang yang lain. Sedangkan balok tampang persegi panjang mempunyai lendutan yang lebih besar dari balok tampang I simetris. Hal ini disebabkan balok tampang T tunggal mempunyai jarak eksentrisitas tendon, dan momen inersia netto serta momen inersia transformasi yang paling besar di antara bentuk penampang balok yang lain. Pada balok tampang persegi panjang, jarak eksentrisitas tendon, momen inersia netto, dan momen inersia transformasi yang ada lebih kecil dibanding dengan balok tampang I simetris. Jarak eksentrisitas tendon, momen inersia netto dan momen inersia transformasi tersebut memberikan pengaruh yang besar terhadap terjadinya camber dan lendutan akibat berat sendiri balok pada saat lendutan sesaat ditambah lendutan akibat beban kerja pada akhir umur layan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Dalam menganalisis lendutan akhir pada balok beton prategang, hal pertama yang ditinjau adalah lendutan seketika baik akibat gaya prategang yang menimbulkan lendutan ke atas (*camber*) dan akibat beban gravitasi yang menimbulkan lendutan ke bawah.
2. Rangkak beton, susut beton dan relaksasi baja prategang akan memberikan tambahan lendutan yang terjadi akibat lendutan seketika seiring dengan bertambahnya waktu serta akan menyebabkan bertambahnya besar kehilangan tegangan tendon.
3. Pertambahan lendutan akibat rangkak tergantung dari besarnya faktor koreksi rangkak beton. Sedangkan besarnya koreksi rangkak beton sangat dipengaruhi oleh antara lain kelembaban relatif, perawatan beton, umur beton pada saat dibebani, dan rasio antara volume–keliling penampang.
4. Tampang balok persegi panjang memerlukan luas penampang yang paling besar di antara bentuk penampang lainnya dalam menahan beban yang sama.

5. Tegangan efektif tendon sangat tergantung dari kehilangan tegangan yang terjadi karena tegangan efektif tendon merupakan tegangan yang telah mengalami reduksi tegangan akibat kehilangan tegangan.
6. Pada tinjauan kehilangan tegangan tendon terhadap waktu pembebanan, umur 1 tahun setelah beban layan bekerja, terjadi peningkatan yang besar tetapi berangsur-angsur peningkatan tersebut menurun untuk tahun-tahun berikutnya. Dari tinjauan kehilangan tegangan tendon, balok tampang persegi panjang lebih efisien.
7. Pada tinjauan tegangan beton, terjadi prosentase peningkatan tegangan beton yang besar pada umur 1 tahun setelah beban layan bekerja. Tetapi tahun-tahun berikutnya prosentase peningkatan tegangan tersebut semakin menurun. Dari tinjauan tegangan, balok tampang T tunggal lebih efisien dibanding dengan balok tampang persegi panjang maupun balok tampang I simetris.
8. Pada umur 1 tahun setelah beban layan bekerja, terjadi prosentase peningkatan lendutan yang besar. Sedangkan pada tahun-tahun berikutnya prosentase peningkatan tersebut semakin berkurang. Pada tinjauan lendutan, balok tampang T tunggal lebih efisien baik lendutan sesaat maupun lendutan akhir umur layan balok.

5.2 Saran-saran

1. Untuk penulisan Tugas Akhir mengenai desain beton prategang selanjutnya, tipe tampang dan panjang hendaknya lebih bervariasi.
2. Untuk pembahasan selanjutnya perlu ditinjau masalah geser lentur dan atau puntir sebagaimana disyaratkan dalam SK-SNI 1991.

DAFTAR PUSTAKA

1. —————, 1983, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)*, Michigan.
2. —————, 1991, *Tata Cara Perhitungan Struktur Untuk Bangunan Gedung (SK SNI T-15-1993-03)*, Yayasan LPMB, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.
3. Branson, D.E., 1977, *Deformation of Concrete Structures*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
4. Libby, J.R., 1988, *Modern Prestressed Concrete*, Third Edition, Van Nostrand Reinhold, New York.
5. Lin, T.Y. dan Burns, N.H., 1993, *Desain Struktur Beton Prategang*, Jilid 1 dan 2, Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta.
6. Istimawan Dipohusodo, 1994, *Struktur Beton Bertulang*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
7. Naaman, A.E., 1982, *Prestressed Concrete Analysis and Design*, Mc. Graw Hill Inc., New York.
8. Nawy, E.G., 1996, *Prestressed Concrete A Fundamental Approach*, Prentice-Hill, New York.
9. Nilson, A.H., 1982, *Design of Prestressed Concrete*, Second Edition, John Willey & Son Inc., New York.
10. Raju, K., 1993, *Beton Prategang*, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta.

11. Wang, C.K., & Salmon, C.G., 1992. *Desain Beton Bertulang*, Jilid 1 dan 2, Erlangga, Jakarta.
12. Winarni Hadipratomo, 1987. *Struktur Beton Prategang*, Nova, Bandung.

Bentuk T Tunggal

Diambil :

$$\begin{aligned}
 b_w &= 0,5 b \\
 t &= 0,12 h \\
 h_w &= 0,88 h \\
 A_1 &= 0,12 bh \\
 A_2 &= 0,44 bh \\
 A_c &= 0,56 bh \\
 C_b &= 0,547142857 h \\
 C^t &= 0,452857143 h \\
 I_1 &= 0,018664408 bh^3 \\
 I_2 &= 0,033445687 bh^3 \\
 I_c &= 0,052110095 bh^3 \\
 S^t &= 0,115069611 bh^2 \\
 S_b &= 0,095240383 bh^2 \\
 r^2 &= 0,093053741 h^2 \\
 k^t &= 0,170072112 h \\
 k_b &= 0,205481448 h
 \end{aligned}$$

$$S_{rencana} = 67553000 \text{ mm}^3$$

diambil :

$$\begin{aligned}
 h &= 1200 \text{ mm} \\
 b &= 407,681969 \\
 \text{diambil :} & \quad 500 \text{ mm} \\
 A_c &= 336000 \text{ mm}^2 \\
 C^t &= 543,4285714 \text{ mm} \\
 C_b &= 656,5714286 \text{ mm} \\
 I &= 45023122286 \text{ mm}^4 \\
 S^t &= 82850119,87 \text{ mm}^3 \\
 S_b &= 68573075,72 \text{ mm}^3 \\
 r^2 &= 133997,3878 \text{ mm}^2 \\
 k_b &= 246,5777377 \text{ mm} \\
 k^t &= 204,0865349 \text{ mm} \\
 w_D &= 0,84 \text{ t/m} \\
 &< 1,35 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

OK !

1. Data Analisis

$$\begin{aligned}
 L &= 20 \text{ m} \\
 B &= 3 \text{ m} \\
 f_{pu} &= 1860 \text{ Mpa} \\
 f'_c &= 45 \text{ Mpa} \\
 w_{SD} &= 0,5 \text{ t/m} \\
 w_L &= 0,4 \text{ t/m} \\
 E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\
 LoS &= 20 \% \\
 RH &= 60 \% \\
 f_{ci} &= 25,65 \text{ Mpa} \\
 f_{ti} &= 1,636 \text{ Mpa} \\
 f_{cs} &= 20,25 \text{ Mpa} \\
 f_{ts} &= 3,354 \text{ Mpa} \\
 E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\
 E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

2. Momen Lentur

a. Akibat beban mati :

$$\begin{aligned}
 w_{SD} &= 1,5 \text{ t/m} \\
 M_{SD} &= 75 \text{ t.m} \\
 &= 735502500 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

b. Akibat beban hidup :

$$\begin{aligned}
 w_L &= 1,2 \text{ t/m} \\
 M_{SD} &= 60 \text{ t.m} \\
 &= 588402000 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

3. Dimensi Penampang

$$\begin{aligned}h &= 1200 \text{ mm} \\b &= 500 \text{ mm} \\t &= 144 \text{ mm} \\b_w &= 250 \text{ mm} \\A_c &= 336000 \text{ mm}^2 \\k_b &= 246,5777377 \text{ mm} \\k^i &= 204,0865349 \text{ mm} \\C_b &= 656,5714286 \text{ mm} \\C^t &= 543,4285714 \text{ mm} \\I &= 45023122286 \text{ mm}^4 \\r^2 &= 133997,3878 \text{ mm}^2 \\S_b &= 68573075,72 \text{ mm}^3 \\S^t &= 82850119,87 \text{ mm}^3 \\w_D &= 0,84 \text{ t/m} \\M_D &= 42 \text{ t.m} \\&= 411881400 \text{ N.mm} \\M_T &= 1735785900 \text{ N.mm} \\M_D/M_T &= 0,237288136 > 0.20 \\P_e &= 2225366,538 \text{ N} \\P_o &= 2781708,173 \text{ N} \\e &= 394,6455343 \text{ mm} \\d &= 261,9258942 \text{ mm} \\P_e &= 2899102,936 \text{ N} \\P_o &= 3623878,671 \text{ N}\end{aligned}$$

4. Jumlah tendon

$$: 1,644228072 = 2$$

Dipakai 2 buah tendon VSL tipe 5-12

5. Kontrol luas penampang

$$\begin{aligned}P_o/f_{ci} &= 141281,8195 \\M_D/P_o &= 113,6576131 \\A_c &= 335799,7224 < 336000\end{aligned}$$

OK !

6. Sifat Penampang

a. Saat Transfer :

$$\begin{aligned}\text{jml. tendon} &= 2 \text{ buah} \\A_{sheath} &= 8146,285714 \text{ mm}^2 \\A_c &= 336000 \text{ mm}^2 \\A_{netto} &= 327853,7143 \text{ mm}^2 \\C_b &= 679,3936242 \text{ mm} \\C^t &= 520,6063758 \text{ mm} \\h_w &= 1056 \text{ mm} \\I_1 &= 14614248987 \\I_2 &= 30583879778 \\I_{sheath} &= 1422368414 \text{ mm}^4 \\I_{netto} &= 43775760350 \text{ mm}^4 \\S_b &= 64433575,45 \text{ mm}^3 \\S^t &= 84086101,11 \text{ mm}^3 \\r^2 &= 133522,234 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

b. Saat Layan :

$$\begin{aligned}A_c &= 336000 \text{ mm}^2 \\A_{ps} &= 2368,8 \text{ mm}^2 \\E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\n &= 6,145644979 \\A_{transf.} &= 348189,0038 \text{ mm}^2 \\C_b &= 635,3688589 \text{ mm} \\C^t &= 564,6311411 \text{ mm} \\I_1 &= 17597767762 \text{ mm}^4 \\I_2 &= 27576402974 \text{ mm}^4 \\I_{Aps} &= 1699874182 \text{ mm}^4 \\I_{transf.} &= 46874044917 \text{ mm}^4 \\S^t &= 83017108,89 \text{ mm}^3 \\S_b &= 73774539,4 \text{ mm}^3 \\r^2 &= 134622,416 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

7. Kontrol Eksentrisitas

$$\begin{aligned}
 f_{pi} &= 1395 \text{ Mpa} & 5. \text{ Susut :} \\
 P_i &= 3304476 \text{ N} & v &= 336000 \text{ mm}^2 \\
 P_i/A_{netto} &= 10,07911717 & s &= 3400 \text{ mm} \\
 M_D \cdot C^t/I &= 4,898329148 & v/s &= 3,892609351 \\
 P_i \cdot e \cdot C^t/I &= 0,039298718 & SH &= 31,07977197 \text{ Mpa} \\
 e_{kritis} &= 422,7477902 \text{ mm} \\
 e_{ada} &= 417,46773 & 6. \text{ Relaksasi} \\
 &< 422,7477902 \text{ OK!} & f_{pi} &= 1114,886387 \\
 && f_{py} &= 1670 \\
 && f_{pi}/f_{py} &= 0,667596639 \\
 && \log .. &= 0,464147411 \\
 && RE &= 60,85292431 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

8. Kehilangan Tegangan

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Angkur :} \\
 a &= 3 \text{ mm} \\
 AN &= 29,25 \text{ Mpa} & 7. \text{ Tegangan efektif umur 5 tahun :} \\
 && f_{pe} &= 1054,83422 \text{ N} \\
 2. \text{ Deformasi Elastis :} \\
 P_i/A_{netto} &= 10,07911717 & 8. \text{ Gaya efektif :} \\
 1+e^2/r^2 &= 2,305245579 & P_e &= 2498691,3 \text{ Mpa} \\
 M_D \cdot e/I_{netto} &= 3,927908772 & 9. \text{ Total kehilangan tegangan :} \\
 f_{cs} &= 19,30693152 & &= 340,1657803 \text{ Mpa} \\
 n &= 6,305295012 \\
 ES &= 60,8679495 \text{ Mpa} \\
 3. \text{ Gesekan :} \\
 u &= 0,2 & 10. \text{ Prosentase :} \\
 K &= 0,0007 & &= 14,84775408 \% \\
 radian &= 0,166987092 \\
 FR &= 66,11939867 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

9. Kontrol Tegangan

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Saat Transfer :} \\
 a. \text{ Serat atas} \\
 P_i/A_{netto} &= 8,950275204 \\
 e \cdot C^t/r^2 &= 1,627716639 \\
 M_D/S^t &= 4,898329148 \\
 f^t &= 0,719907521 < 1,636 \text{ OK!} \\
 b. \text{ Serat bawah :} \\
 P_i/A_{netto} &= 8,950275204 \\
 e \cdot C_b/r^2 &= 2,124177417 \\
 M_D/S_b &= 6,392341215 \\
 f_b &= -21,56990645 < -25,65 \text{ OK!}
 \end{aligned}$$

4. Rangkak

$$\begin{aligned}
 f_{pi} &= 1238,762652 \text{ Mpa} \\
 P_i &= 2934380,97 \text{ N} \\
 P_i/A_{transf.} &= 8,427552098 \\
 M_D \cdot e/I_{transf.} &= 3,668281527 \\
 1+e^2/r^2 &= 2,29457865 \\
 f_{cs} &= 15,66939959 \\
 f_{csd} &= 6,550502728 \\
 CR &= 91,99573585 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

2. Saat Layan

a. Serat atas :

$$\begin{aligned}P_e &= 2498691,3 \text{ N} \\P_e/A_{netto} &= 7,621360353 \\e.C^t/r^2 &= 1,627716639 \\M_D/S^t &= 4,898329148 \\(M_{SD}+M_L)/S^t_{transf} &= 15,94736938 \\f^t &= -16,0616438 < -20,25 \\&\text{OK !}\end{aligned}$$

b. Serat bawah :

$$\begin{aligned}P_e/A_{netto} &= 7,621360353 \\e.C_b/r^2 &= 2,124177417 \\M_D/S_b &= 6,392341215 \\(M_{SD}+M_L)/S_b_{transf} &= 17,94527639 \\f_b &= 0,527135703 < 3,354 \\&\text{OK !}\end{aligned}$$

d. Beban hidup :

$$\begin{aligned}M_L &= 588402000 \\ \delta_L &= 16,48402724 \text{ mm}\end{aligned}$$

e. Lendutan awal :

$$\delta_{(0\text{ thn})} = 25,02561483 \text{ mm}$$

f. Lendutan akhir 5 tahun : dengan :

$$\begin{aligned}P_i &= 2934380,97 \text{ N} \\AP &= 661600,7016 \text{ N} \\AP/P_i &= 0,225465169 \\1-AP/2P_i &= 0,887267415 \\b_s &= 1,13 \\k_r &= 1 \\C_t &= 1,682240068 \\ \delta_{camber} &= 37,70207628 \text{ mm} \\ \delta_D &= 12,67646145 \text{ mm} \\ \delta_{SD} &= 20,60503406 \text{ mm} \\ \delta_L &= 16,48402724 \text{ mm}\end{aligned}$$

10. Analisa Lendutan

a. Camber :

$$\begin{aligned}P_i &= 2934380,97 \text{ N} \\e &= 417,46773 \text{ mm} \\E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa} \\I_{netto} &= 43775760350 \text{ mm}^4 \\ \delta_{camber} &= 37,70207628 \text{ mm}\end{aligned}$$

b. Berat Sendiri :

$$\begin{aligned}M_D &= 411881400 \text{ N.mm} \\E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa} \\ \delta_D &= 12,67646145 \text{ mm}\end{aligned}$$

c. Beban mati :

$$\begin{aligned}M_{SD} &= 735502500 \text{ N.mm} \\E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\I_{transf} &= 46874044917 \text{ mm}^4 \\ \delta_{SD} &= 20,60503406 \text{ mm}\end{aligned}$$

Lendutan/camber umur 5 tahun :

$$\begin{aligned}\text{Bagian 1 :} & 37,70207628 \text{ mm} \\ \text{Bagian 2 :} & 12,67646145 \text{ mm} \\ \text{Bagian 3 :} & 47,77349331 \text{ mm} \\ \text{Bagian 4 :} & 21,32485138 \text{ mm} \\ \text{Bagian 5 :} & 20,60503406 \text{ mm} \\ \text{Bagian 6 :} & 39,1687537 \text{ mm} \\ \text{Bagian 7 :} & 16,48402724 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\delta_{T(5\text{ thn})} = -24,78355824 \text{ mm}$$

11. Perhitungan Lendutan terhadap variasi lama pembebanan

| 1 Hari | 1 Minggu | 1 Bulan |
|---|--|--|
| Tegangan efektif : $f_{pe} = 1097,59162 \text{ Mpa}$ | Tegangan efektif : $f_{pe} = 1086,5118 \text{ Mpa}$ | Tegangan efektif : $f_{pe} = 1078,2255 \text{ Mpa}$ |
| Total kehilangan tegangan : $= 297,408377 \text{ Mpa}$ | Total kehilangan tegangan : $= 308,48819 \text{ Mpa}$ | Total kehilangan tegangan : $= 316,77445 \text{ Mpa}$ |
| Prosentase kehilangan tegangan : $= 11,3961321 \%$ | Prosentase kehilangan tegangan : $= 12,290558 \%$ | Prosentase kehilangan tegangan : $= 12,959473 \%$ |
| dengan : $P_i = 2934380,97 \text{ N}$ $AP = 560316,964 \text{ N}$ $AP/P_i = 0,19094895$ $1-AP/2P_i = 0,90452553$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,16982511$ $\delta_{Camber} = 37,7020763 \text{ mm}$ $\delta_D = 12,6764615 \text{ mm}$ $\delta_{SD} = 20,6050341 \text{ mm}$ $\delta_L = 16,4840272 \text{ mm}$ | dengan : $P_i = 2934381 \text{ N}$ $AP = 586562,84 \text{ N}$ $AP/P_i = 0,1998932$ $1-AP/2P_i = 0,9000534$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,4543766$ $\delta_{Camber} = 37,702076 \text{ mm}$ $\delta_D = 12,676461 \text{ mm}$ $\delta_{SD} = 20,605034 \text{ mm}$ $\delta_L = 16,484027 \text{ mm}$ | dengan : $P_i = 2934381 \text{ N}$ $AP = 606191,33 \text{ N}$ $AP/P_i = 0,2065824$ $1-AP/2P_i = 0,8967088$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,8124355$ $\delta_{Camber} = 37,702076 \text{ mm}$ $\delta_D = 12,676461 \text{ mm}$ $\delta_{SD} = 20,605034 \text{ mm}$ $\delta_L = 16,484027 \text{ mm}$ |
| Lendutan yang terjadi : | Lendutan yang terjadi : | Lendutan yang terjadi : |
| Bagian 1 : 37,7020763 mm | Bagian 1 : 37,702076 mm | Bagian 1 : 37,702076 mm |
| Bagian 2 : 12,6764615 mm | Bagian 2 : 12,676461 mm | Bagian 2 : 12,676461 mm |
| Bagian 3 : -1,4077126 mm | Bagian 3 : 7,8823731 mm | Bagian 3 : 19,678061 mm |
| Bagian 4 : 2,1527815 mm | Bagian 4 : 5,7598876 mm | Bagian 4 : 10,298807 mm |
| Bagian 5 : 20,6050341 mm | Bagian 5 : 20,605034 mm | Bagian 5 : 20,605034 mm |
| Bagian 6 : 3,95415502 mm | Bagian 6 : 10,579563 mm | Bagian 6 : 18,916495 mm |
| Bagian 7 : 16,4840272 mm | Bagian 7 : 16,484027 mm | Bagian 7 : 16,484027 mm |
| $\delta_{(1 \text{ hari})} = -19,578096 \text{ mm}$ | $\delta_{(7 \text{ hari})} = -20,520524 \text{ mm}$ | $\delta_{(1 \text{ bulan})} = -21,60069 \text{ mm}$ |

0,5 Tahun

1 Tahun

2 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1067,9449 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1063,998 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1060,05149 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 327,05509 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 331,0018 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 334,948513 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,789384 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,10799 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,4265864 \%$$

dengan :

$$\text{dengan : } P_i = 2934381 \text{ N}$$

$$AP = 630544,1 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2148815$$

$$1-AP/2P_i = 0,8925593$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,2974672$$

$$\delta_{Camber} = 37,702076 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,676461 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,605034 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,484027 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2934381 \text{ N}$$

$$AP = 639893,1 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,218067$$

$$1-AP/2P_i = 0,890966$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,447951$$

$$\delta_{Camber} = 37,70208 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,67646 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,60503 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,48403 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2934380,97 \text{ N}$$

$$AP = 649242,038 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,22125349$$

$$1-AP/2P_i = 0,88937325$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,56792997$$

$$\delta_{Camber} = 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,4840272 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,702076 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,676461 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 35,560028 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 16,447293 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,605034 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 30,209822 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,484027 \text{ mm}$$

$$\delta_{(0,5 \text{ tahun})} = -23,160533 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,70208 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,67646 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 40,41694 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 18,3549 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,60503 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 33,71365 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,48403 \text{ mm}$$

$$\delta_{(1 \text{ tahun})} = -23,7151 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 44,2328861 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 19,8758039 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 36,5071931 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,4840272 \text{ mm}$$

$$\delta_{(2 \text{ tahun})} = -24,213557 \text{ mm}$$

3 Tahun**4 Tahun****6 Tahun**

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1057,7428 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1056,1048 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1053,796099 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 337,25719 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 338,89522 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 341,203901 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,612956 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,745187 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,93155711 \%$$

dengan :

$$P_i = 2934381 \text{ N}$$

$$AP = 654710,83 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2231172$$

$$1-AP/2P_i = 0,8884414$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,6242871$$

$$\delta_{Camber} = 37,702076 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,676461 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,605034 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,484027 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2934381 \text{ N}$$

$$AP = 658591,01 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2244395$$

$$1-AP/2P_i = 0,8877802$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,6586021$$

$$\delta_{Camber} = 37,702076 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,676461 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,605034 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,484027 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2934380,97 \text{ N}$$

$$AP = 664059,8019 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,226303199$$

$$1-AP/2P_i = 0,8868484$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,699761723$$

$$\delta_{Camber} = 37,70207628 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,67646145 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,60503406 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,48402724 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,702076 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,676461 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 45,995279 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 20,590213 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,605034 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 37,819395 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,484027 \text{ mm}$$

$$\delta_{(3 \text{ tahun})} = -24,477776 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,702076 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,676461 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 47,053498 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,025205 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,605034 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 38,618374 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,484027 \text{ mm}$$

$$\delta_{(4 \text{ tahun})} = -24,653528 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,70207628 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,67646145 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 48,30117674 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,54696396 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,60503406 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 39,57672245 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,48402724 \text{ mm}$$

$$\delta_{(6 \text{ tahun})} = -24,88595615 \text{ mm}$$

8 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1052,15807 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 342,841934 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 15,0637885 \%$$

dengan :

$$P_i = 2934380,97 \text{ N}$$

$$AP = 667939,974 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,22762551$$

$$1-AP/2P_i = 0,88618724$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,72439287$$

$$\delta_{Camber} = 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,4840272 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 49,0319065 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,8591997 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 40,1502264 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,4840272 \text{ mm}$$

$$\delta_{(8 \text{ tahun})} = -25,040966 \text{ mm}$$

10 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1050,88751 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 344,112491 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 15,1663551 \%$$

dengan :

$$P_i = 2934380,97 \text{ N}$$

$$AP = 670949,67 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,22865118$$

$$1-AP/2P_i = 0,88567441$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,74117477$$

$$\delta_{Camber} = 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,4840272 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 37,7020763 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6764615 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 49,5202732 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 22,0719349 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 20,6050341 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 40,540971 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,4840272 \text{ mm}$$

$$\delta_{(10 \text{ tahun})} = -25,156079 \text{ mm}$$

Bentuk I Simetris

Diambil :

$$\begin{aligned}
 b_w &= 0,72 b \\
 t &= 0,12 h \\
 h_w &= 0,76 h \\
 A_1 &= 0,12 bh \\
 A_2 &= 0,5472 bh \\
 A_3 &= 0,12 bh \\
 A_c &= 0,7872 bh \\
 C_b &= 0,5 h \\
 C^t &= 0,5 h \\
 I_1 &= 0,023376 \\
 I_2 &= 0,02633856 \\
 I_3 &= 0,023376 \\
 I_c &= 0,07309056 bh^3 \\
 S^t &= 0,14618112 bh^2 \\
 S_b &= 0,14618112 bh^2 \\
 r^2 &= 0,09284878 h^2 \\
 k^t &= 0,185697561 h \\
 k_b &= 0,185697561 h
 \end{aligned}$$

$$S_{rencana} = 67553000 \text{ mm}^3$$

diambil :

$$\begin{aligned}
 h &= 1200 \text{ mm} \\
 b &= 320,9156255 \\
 \text{diambil} &= 350 \text{ mm} \\
 A_c &= 330624 \text{ mm}^2 \\
 C^t &= 600 \text{ mm} \\
 C_b &= 600 \text{ mm} \\
 I &= 44205170688 \text{ mm}^4 \\
 S^t &= 73675284,48 \text{ mm}^3 \\
 S_b &= 73675284,48 \text{ mm}^3 \\
 r^2 &= 133702,2439 \text{ mm}^2 \\
 k_b &= 222,8370732 \text{ mm} \\
 k^t &= 222,8370732 \text{ mm} \\
 w_D &= 0,82656 \text{ t/m} \\
 &< 1,35 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

OK !

1. Data Analisis

$$\begin{aligned}
 L &= 20 \text{ m} \\
 B &= 3 \text{ m} \\
 f_{pu} &= 1860 \text{ Mpa} \\
 f'_c &= 45 \text{ Mpa} \\
 w_{SD} &= 0,5 \text{ t/m}^2 \\
 w_L &= 0,4 \text{ t/m}^2 \\
 E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\
 LoS &= 20 \% \\
 RH &= 60 \% \\
 f_{ci} &= 25,65 \text{ Mpa} \\
 f_t &= 1,636 \text{ Mpa} \\
 f_{cs} &= 20,25 \text{ Mpa} \\
 f_{ts} &= 3,354 \text{ Mpa} \\
 E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\
 E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

2. Momen Lentur

a. Akibat beban mati :

$$\begin{aligned}
 w_{SD} &= 1,5 \text{ t/m} \\
 M_{SD} &= 75 \text{ t.m} \\
 &= 735502500 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

b. Akibat beban hidup :

$$\begin{aligned}
 w_L &= 1,2 \text{ t/m} \\
 M_L &= 60 \text{ t.m} \\
 &= 588402000 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

entrisit

=
=
etto 10,
= 5,4
= 0,0
= 39
= 39
< 39

Tegan

=
=
s :
= 10,
= 2,1
= 3,6
= 18
= 6,3
= 57,
= 0,
= 63,0

= 124
= 294
= 8,60
= 2,13
= 3
= 14,9
= 6,26
= 87,

3. Dimensi Penampang

$$\begin{aligned}
 h &= 1200 \text{ mm} \\
 b &= 350 \text{ mm} \\
 t &= 144 \text{ mm} \\
 h_w &= 912 \text{ mm} \\
 b_w &= 252 \text{ mm} \\
 A_c &= 330624 \text{ mm}^2 \\
 k_b &= 222,8370732 \text{ mm} \\
 k^t &= 222,8370732 \text{ mm} \\
 C_b &= 600 \text{ mm} \\
 C^t &= 600 \text{ mm} \\
 I &= 44205170688 \text{ mm}^4 \\
 r^2 &= 133702,2439 \text{ mm}^2 \\
 S_b &= 73675284,48 \text{ mm}^3 \\
 S^t &= 73675284,48 \text{ mm}^3 \\
 w_D &= 0,82656 \text{ t/m} \\
 M_D &= 41,328 \text{ t.m} \\
 &= 405291297,6 \text{ N.mm} \\
 M_T &= 1729195798 \text{ N.mm} \\
 M_D/M_T &= 0,23438138 > 0,2 \\
 P_e &= 2216917,689 \text{ N} \\
 P_o &= 2771147,112 \text{ N} \\
 e &= 369,0910544 \text{ mm} \\
 d &= 230,9089456 \text{ mm} \\
 P_e &= 2921293,51 \text{ N} \quad 163,737948 \\
 P_o &= 3651616,888 \text{ N} \quad 19,7379478 \\
 &\quad -19,737948
 \end{aligned}$$

4. Jumlah Tendon

$$\begin{aligned}
 &: 1,65681347 = 2 \\
 &\text{dipakai 2 buah tendon VSL tipe 5-12}
 \end{aligned}$$

5. Kontrol Luas Penampang

$$\begin{aligned}
 P_o/f_{ci} &= 142363,2315 \\
 M_D/P_o &= 110,9895452 \\
 A_c &= 307255,7441 < 330624 \\
 &\text{OK!}
 \end{aligned}$$

6. Sifat Penampang

1. Saat Transfer :

$$\begin{aligned}
 n &= 2 \\
 A_{sheath} &= 8146,285714 \text{ mm}^2 \\
 A_c &= 330624 \text{ mm}^2 \\
 A_{netto} &= 322477,7143 \text{ mm}^2 \\
 C_b &= 620,9900448 \text{ mm} \\
 C^t &= 579,0099552 \text{ mm} \\
 I_1 &= 13042869571 \\
 I_2 &= 16030817401 \\
 I_3 &= 15277150693 \\
 I_{sheath} &= 1244844217 \\
 I_{netto} &= 43105993448 \text{ mm}^4 \\
 S_b &= 69414950,87 \text{ mm}^3 \\
 S^t &= 74447758,73 \text{ mm}^3 \\
 r^2 &= 133671,2323 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

b. Saat Layan :

$$\begin{aligned}
 A_c &= 330624 \text{ mm}^2 \\
 A_{ps} &= 2368,8 \text{ mm}^2 \\
 E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\
 E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\
 n &= 6,145644979 \\
 A_{transf.} &= 342813,0038 \text{ mm}^2 \\
 C_b &= 580,2620522 \text{ mm} \\
 C^t &= 619,7379478 \text{ mm} \\
 I_1 &= 15207940918 \\
 I_2 &= 16019097435 \\
 I_3 &= 13106939009 \\
 I_{Aps} &= 1487638579 \\
 I_{transf.} &= 45821615942 \text{ mm}^4 \\
 S^t &= 73937082,77 \text{ mm}^3 \\
 S_b &= 78967107,65 \text{ mm}^3 \\
 r^2 &= 133663,5875 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

a. Lend

Hari

aktif :

1107,8f

gan teg

287,13

ehilang

11,026f

29495

543909

0,1844f

0,9077f

0,16884

35,9611

12,6674

21,0782

16,8626

g terjad

35,9611

2,6674

1,1194

1,13878

1,0782

0,02153

6,8626

21,927

2. Saat Layan

a. Serat atas :

$$P_e = 2519522,302 \text{ N}$$

$$P_e/A_{netto} = 7,813012157$$

$$e.C^t/r^2 = 1,689674255$$

$$M_D/S^t = 5,443969093$$

$$(M_{SD}+M_L)/S^t_{transf} = 17,90582547$$

$$f^t = -17,9613612 < -20,25$$

OK!

b. Serat bawah :

$$P_e/A_{netto} = 7,813012157$$

$$e.C_b/r^2 = 1,812181089$$

$$M_D/S_b = 5,838674414$$

$$(M_{SD}+M_L)/S_b_{transf} = 16,76526518$$

$$f_b = 0,632334554 < 3,354$$

OK!

10. Analisa Lendutan

a. Camber :

$$P_i = 2949556,902 \text{ N}$$

$$e = 390,0810992 \text{ mm}$$

$$E_{ci} = 30926,388 \text{ Mpa}$$

$$I_{netto} = 43105993448 \text{ mm}^4$$

$$\delta_{camber} = 35,96115121 \text{ mm}$$

b. Berat Sendiri :

$$M_D = 405291297,6 \text{ N.mm}$$

$$E_{ci} = 30926,388 \text{ Mpa}$$

$$\delta_D = 12,6674494 \text{ mm}$$

c. Beban mati :

$$M_{SD} = 735502500 \text{ N.mm}$$

$$E_c = 31729,786 \text{ Mpa}$$

$$I_{transf} = 45821615942 \text{ mm}^4$$

$$\delta_{SD} = 21,07828962 \text{ mm}$$

d. Beban hidup :

$$M_L = 588402000 \text{ N.mm}$$

$$\delta_L = 16,8626317 \text{ mm}$$

e. Lendutan awal :

$$\delta_{T(0 \text{ tahun})} = 23,29370181 \text{ mm}$$

f. Lendutan akhir 5 tahun :

dengan :

$$P_i = 2949556,902 \text{ N}$$

$$AP = 648705,7546 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,21993329$$

$$1-AP/2P_i = 0,890033355$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_f = 1,672490526$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,96115121 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6674494 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 45,62172119 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,18618911 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07828962 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 39,83616086 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,8626317 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(5 \text{ tahun})} = -30,0478483 \text{ mm}$$

0,5 Tahun**1 Tahun****2 Tahun**

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1077,1935 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1073,11 \text{ Mpa}$$

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1069,02635 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 317,80646 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 321,8901 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 325,973653 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,49019 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,81815 \%$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,1461008 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949556,9 \text{ N}$$

$$AP = 616571,99 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2090389$$

$$1-AP/2P_i = 0,8954806$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,2899476$$

$$\delta_{Camber} = 35,961151 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,667449 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,07829 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,862632 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2949557 \text{ N}$$

$$AP = 626245,2 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,212318$$

$$1-AP/2P_i = 0,893841$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,43956$$

$$\delta_{Camber} = 35,96115 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,66745 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,07829 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,86263 \text{ mm}$$

dengan :

$$P_i = 2949556,9 \text{ N}$$

$$AP = 635918,446 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,21559796$$

$$1-AP/2P_i = 0,89220102$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,55884292$$

$$\delta_{Camber} = 35,9611512 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,6674494 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,0782896 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,8626317 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,961151 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,667449 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 34,022276 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 16,340346 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07829 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 30,724575 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,862632 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,96115 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,66745 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 38,63734 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 18,23555 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07829 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 34,28811 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,86263 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,9611512 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6674494 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 42,2616632 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 19,7465639 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,0782896 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 37,1292492 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,8626317 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(0,5 \text{ tahun})} = -27,689865 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(1 \text{ tahun})} = -28,5335 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(2 \text{ tahun})} = -29,261369 \text{ mm}$$

3 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1066,6376 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 328,3624 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,337942 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949556,9 \text{ N}$$

$$AP = 641576,92 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2175164$$

$$1-AP/2P_i = 0,8912418$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,6148734$$

$$\delta_{Camber} = 35,961151 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,667449 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,07829 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,862632 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,961151 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,667449 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 43,934686 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 20,456328 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07829 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 38,46381 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,862632 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(3 \text{ tahun})} = -29,632671 \text{ mm}$$

4 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1064,9427 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 330,05725 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,474056 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949556,9 \text{ N}$$

$$AP = 645591,67 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,2188775$$

$$1-AP/2P_i = 0,8905612$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,6489895$$

$$\delta_{Camber} = 35,961151 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,667449 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,07829 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,862632 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,961151 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,667449 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 44,938804 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 20,888491 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07829 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 39,276403 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,862632 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(4 \text{ tahun})} = -29,87331 \text{ mm}$$

6 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1062,553998 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 332,4460 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,66589748 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949557 \text{ N}$$

$$AP = 651250,1 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,220796$$

$$1-AP/2P_i = 0,889602$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,68991$$

$$\delta_{Camber} = 35,96115 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,66745 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,07829 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,86263 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,96115 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,66745 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 46,12205 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,40686 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,07829 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 40,25108 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,86263 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(6 \text{ tahun})} = -30,18311 \text{ mm}$$

8 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1060,85915 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 334,140848 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,8020112 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949557 \text{ N}$$

$$AP = 655264,9 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,222157$$

$$1-AP/2P_i = 0,888921$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,714399$$

$$\delta_{Camber} = 35,961151 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,667449 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,078290 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,862632 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,961151 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,667449 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 46,814552 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,717063 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,078290 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 40,834357 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,862632 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(8 \text{ tahun})} = -30,384088 \text{ mm}$$

10 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1059,54453 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 335,455473 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 14,9075892 \%$$

dengan :

$$P_i = 2949556,9 \text{ N}$$

$$AP = 658378,98 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,22321284$$

$$1-AP/2P_i = 0,88839358$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,73108367$$

$$\delta_{Camber} = 35,9611512 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 12,6674494 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,0782896 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 16,8626317 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,9611512 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 12,6674494 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 47,2770745 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,9284148 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,0782896 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 41,2317597 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 16,8626317 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(10 \text{ tahun})} = -30,53032 \text{ mm}$$

Bentuk Persegi Panjang

Diambil :

$$\begin{aligned}
 C_b &= 0,5 h \\
 C^t &= 0,5 h \\
 I_c &= 0,083333333 bh^3 \\
 A_c &= 1 bh \\
 S^t &= 0,166666667 bh^2 \\
 S_b &= 0,166666667 bh^2 \\
 r^2 &= 0,083333333 h^2 \\
 k^t &= 0,166666667 h \\
 k_b &= 0,166666667 h
 \end{aligned}$$

$$S_{rencana} = 67553000 \text{ mm}^3$$

diambil :

$$\begin{aligned}
 h &= 1200 \text{ mm} \\
 b &= 281,4708333
 \end{aligned}$$

diambil : 300 mm

$$\begin{aligned}
 A_c &= 360000 \text{ mm}^2 \\
 C^t &= 600 \text{ mm} \\
 C_b &= 600 \text{ mm} \\
 I_c &= 43200000000 \text{ mm}^4 \\
 S^t &= 72000000 \text{ mm}^3 \\
 S_b &= 72000000 \text{ mm}^3 \\
 r^2 &= 120000 \text{ mm}^2 \\
 k_b &= 200 \text{ mm} \\
 k^t &= 200 \text{ mm} \\
 w_D &= 0,9 \text{ t/m} \\
 &< 1,35 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

OK !

1. Data Analisis

$$\begin{aligned}
 L &= 20 \text{ m} \\
 B &= 3 \text{ m} \\
 f_{pu} &= 1860 \text{ Mpa} \\
 f_c &= 45 \text{ Mpa} \\
 w_{SD} &= 0,5 \text{ t/m} \\
 w_L &= 0,4 \text{ t/m} \\
 E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\
 LoS &= 20 \% \\
 RH &= 60 \% \\
 f_{ci} &= 25,65 \text{ Mpa} \\
 f_{ti} &= 1,636 \text{ Mpa} \\
 f_{cs} &= 20,25 \text{ Mpa} \\
 f_{ts} &= 3,354 \text{ Mpa} \\
 E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\
 E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

2. Momen Lentur

1. Akibat beban mati :

$$\begin{aligned}
 w_{SD} &= 1,5 \text{ t/m} \\
 M_{SD} &= 75 \text{ t.m} \\
 &= 735502500 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

2. Akibat beban hidup :

$$\begin{aligned}
 w_L &= 1,2 \text{ t/m} \\
 M_L &= 60 \text{ t.m} \\
 &= 588402000 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

3. Dimensi Penampang

$$\begin{aligned}h &= 1200 \text{ mm} \\b &= 300 \text{ mm} \\A_c &= 360000 \text{ mm}^2 \\k_b &= 200 \text{ mm} \\k' &= 200 \text{ mm} \\C_b &= 600 \text{ mm} \\C' &= 600 \text{ mm} \\I_c &= 43200000000 \text{ mm}^4 \\r^2 &= 120000 \text{ mm}^2 \\S_b &= 72000000 \text{ mm}^3 \\S' &= 72000000 \text{ mm}^3 \\w_D &= 0,9 \text{ t/m} \\M_D &= 45 \text{ t.m} \\&= 441301500 \text{ N.m} \\M_T &= 1765206000 \text{ N.m} \\M_D/M_T &= 0,25 > 0,20 \\P_e &= 2263084,615 \text{ N} \\P_o &= 2828855,769 \text{ N} \\e &= 356 \text{ mm} \\d &= 244 \text{ mm} \\P_e &= 3174830,935 \text{ N} \\P_o &= 3968538,669 \text{ N}\end{aligned}$$

4. Jumlah tendon

$$: 1,800607382 = 2$$

Dipakai 2 buah tendon VSL tipe 5-12

5. Kontrol luas penampang

$$\begin{aligned}P_{afci} &= 154718,8565 \\M_D/P_o &= 111,2 \\A_c &= 344094,7368 < 360000 \\&\text{OK!}\end{aligned}$$

6. Sifat Penampang

1. Saat Transfer :

$$\begin{aligned}\text{Jml. tendon} &: 2 \text{ buah} \\A_{sheath} &= 8146,285714 \text{ mm}^2 \\A_c &= 360000 \text{ mm}^2 \\A_{netto} &= 351853,7143 \text{ mm}^2 \\C_b &= 619,5406922 \text{ mm} \\C' &= 580,4593078 \text{ mm} \\I_c &= 43337461915 \text{ mm}^4 \\I_{sheath} &= 1154156078 \text{ mm}^4 \\I_{netto} &= 42183305837 \text{ mm}^4 \\S_b &= 68088030,96 \text{ mm}^3 \\S' &= 72672287,74 \text{ mm}^3 \\r^2 &= 119888,7609 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

2. Saat Layan :

$$\begin{aligned}A_c &= 360000 \text{ mm}^2 \\A_{ps} &= 2368,8 \text{ mm}^2 \\E_{ps} &= 195000 \text{ Mpa} \\E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\n &= 6,145644979 \\A_{transf} &= 372189,0038 \text{ mm}^2 \\C_b &= 581,90324 \text{ mm} \\C' &= 618,09676 \text{ mm} \\I &= 43317897381 \text{ mm}^4 \\I_{Aps} &= 1391723387 \text{ mm}^4 \\I_{transf} &= 44709620768 \text{ mm}^4 \\S' &= 72334339,31 \text{ mm}^3 \\S_b &= 76833428,13 \text{ mm}^3 \\r^2 &= 120126,1195 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

7. Kontrol Eksentrisitas

$$\begin{aligned}f_{pi} &= 1395 \text{ Mpa} \\P_i &= 3304476 \text{ N} \\P_i/A_{netto} &= 9,39161892 \\M_D \cdot C^t/I_{netto} &= 6,072486689 \\P_i \cdot e \cdot C^t/I_{netto} &= 0,045470923 \\e_{kritis} &= 376,0668243 \text{ mm} \\e_{ada} &= 375,5406922 \text{ mm} \\&< e_{kritis} \quad \text{OK!}\end{aligned}$$

8. Kehilangan Tegangan

1. Angkur :

$$\begin{aligned}a &= 3 \text{ mm} \\AN &= 29,25 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

2. Deformasi Elastis :

$$\begin{aligned}P_i/A_{netto} &= 9,39161892 \\1+e^2/r^2 &= 2,176347227 \\M_D \cdot e/I_{netto} &= 3,928726483 \\f_{cs} &= 16,51069731 \\n &= 6,305295012 \\ES &= 52,05240671 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

3. Gesekan :

$$\begin{aligned}u &= 0,2 \\K &= 0,0007 \\radian &= 0,150216277 \\FR &= 61,44034125 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

4. Rangkak :

$$\begin{aligned}f_{pi} &= 1252,25725 \text{ Mpa} \\P_i &= 2966346,974 \text{ N} \\P_i/A_{transf} &= 7,970001648 \\M_D \cdot e/I_{transf} &= 3,706733986 \\1+e^2/r^2 &= 2,174022869 \\f_{cs} &= 13,62023186 \text{ Mpa} \\f_{csd} &= 6,177889976 \text{ Mpa} \\n &= 6,145644979 \\CR &= 73,18078568 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

5. Susut :

$$\begin{aligned}v &= 360000 \text{ mm}^2 \\s &= 3000 \text{ mm} \\v/s &= 4,726739927 \\SH &= 29,05030025 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

6. Relaksasi :

$$\begin{aligned}f_{pi} &= 1127,031525 \text{ N} \\f_{py} &= 1670 \text{ N} \\f_{pi}/f_{py} &= 0,674869177 \\log t/10 &= 0,464147411 \\RE &= 65,32016073 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

7. Total kehilangan tegangan :

$$f_p = 310,2939966 \text{ Mpa}$$

8. Tegangan efektif umur 5 tahun :

$$\begin{aligned}f_{pe} &= 1084,706003 \text{ Mpa} \\P_e &= 2569451,581 \text{ N}\end{aligned}$$

9. Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,37993824 \%$$

9. Kontrol Tegangan

1. Saat Transfer :

a. Serat bawah :

$$\begin{aligned}P_i/A_{netto} &= 8,430625722 \\e \cdot C_b/r^2 &= 1,940655142 \\M_D/S_b &= 6,481337377 \\f_b &= -18,31022551 < -25,65 \\&\text{OK!}\end{aligned}$$

b. Serat atas :

$$\begin{aligned}P_i/A_{netto} &= 8,430625722 \\e \cdot C^t/r^2 &= 1,818236243 \\M_D/S^t &= 6,072486689 \\f^t &= 0,825756826 < 1,636 \\&\text{OK!}\end{aligned}$$

2. Saat Layan

a. Serat atas :

$$\begin{aligned}P_e &= 2569451,581 \text{ N} \\P_e/A_{netto} &= 7,302613207 \\e.C^t/r^2 &= 1,818236243 \\M_D/S^t &= 6,072486689 \\(M_{SD}+M_L)/S^t_{transf} &= 18,30257265 \\f^t &= -18.3997965 < 20,25\end{aligned}$$

OK!

b. Serat bawah :

$$\begin{aligned}P_e/A_{netto} &= 7,302613207 \\e.C_b/r^2 &= 1,940655142 \\M_D/S_b &= 6,481337377 \\(M_{SD}+M_L)/S_b_{transf} &= 17,23083991 \\f_b &= 2,237710208 < 3,354\end{aligned}$$

OK!

10. Analisa Lendutan

a. Camber :

$$\begin{aligned}P_i &= 2966346,974 \text{ N} \\e &= 375,5406922 \text{ mm} \\E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa} \\I_{netto} &= 42183305837 \text{ mm}^4 \\ \delta_{camber} &= 35,579341 \text{ mm}\end{aligned}$$

b. Berat Sendiri :

$$\begin{aligned}M_D &= 441301500 \text{ N.mm} \\E_{ci} &= 30926,388 \text{ Mpa} \\ \delta_D &= 14,09465176 \text{ mm}\end{aligned}$$

c. Beban mati :

$$\begin{aligned}M_{SD} &= 735502500 \text{ N.mm} \\E_c &= 31729,786 \text{ Mpa} \\I_{transf} &= 44709620768 \text{ mm}^4 \\ \delta_{SD} &= 21,60253823 \text{ mm}\end{aligned}$$

d. Beban hidup :

$$\begin{aligned}M_L &= 588402000 \text{ N.mm} \\ \delta_L &= 17,28203058 \text{ mm}\end{aligned}$$

e. Lendutan awal

$$\delta_{i(0 \text{ tahun})} = 21,48468909 \text{ mm}$$

f. Lendutan akhir 5 tahun :

dengan :

$$\begin{aligned}P_i &= 2966347,0 \text{ N} \\AP &= 611722,6735 \text{ N} \\AP/P_i &= 0,206220877 \\1-AP/2P_i &= 0,896889562 \\b_s &= 1,13 \\k_r &= 1 \\C_t &= 1,543410184\end{aligned}$$

$$\delta_{camber} = 35,579341 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 14,09465176 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,60253823 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 17,28203058 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,57934085 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 14,09465176 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 41,91415733 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 21,75382906 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,60253823 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 37,67598257 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 17,28203058 \text{ mm}$$

$$\delta_{1(5 \text{ tahun})} = -34,9155 \text{ mm}$$

11. Analisa Lendutan terhadap Variasi Lama Pembebanan

| 1 hari | 1 Minggu | 1 Bulan |
|---|--|--|
| Tegangan efektif : = 1130,60224 Mpa | Tegangan efektif : = 1118,7091 Mpa | Tegangan efektif : $f_{pe} = 1109,8145$ Mpa |
| Total kehilangan tegangan : = 264,397756 Mpa | Total kehilangan tegangan : = 276,29095 Mpa | Total kehilangan tegangan : = 285,1855 Mpa |
| Prosentase kehilangan tegangan : = 9,71485736 % | Prosentase kehilangan tegangan : = 10,664598 % | Prosentase kehilangan tegangan : = 11,37488 % |
| dengan : $P_i = 2966347,0$ N $AP = 503003,658$ N $AP/P_i = 0,16957007$ $1-AP/2P_i = 0,91521497$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,15580999$ $\delta_{camber} = 35,579341$ mm $\delta_D = 14,0946518$ mm $\delta_{SD} = 21,6025382$ mm $\delta_L = 17,2820306$ mm | dengan : $P_i = 2966347$ N $AP = 531176,25$ N $AP/P_i = 0,1790675$ $1-AP/2P_i = 0,9104663$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,4168784$ $\delta_{camber} = 35,579341$ mm $\delta_D = 14,094652$ mm $\delta_{SD} = 21,602538$ mm $\delta_L = 17,282031$ mm | dengan : $P_i = 2966347$ N $AP = 552245,68$ N $AP/P_i = 0,1861703$ $1-AP/2P_i = 0,9069149$ $b_s = 1,13$ $k_r = 1$ $C_t = 0,7453878$ $\delta_{camber} = 35,579341$ mm $\delta_D = 14,094652$ mm $\delta_{SD} = 21,602538$ mm $\delta_L = 17,282031$ mm |
| Lendutan yang terjadi : Bagian 1 : 35,5793409 mm Bagian 2 : 14,0946518 mm Bagian 3 : -0,9595902 mm Bagian 4 : 2,19608755 mm Bagian 5 : 21,6025382 mm Bagian 6 : 3,80345713 mm Bagian 7 : 17,2820306 mm | Lendutan yang terjadi : Bagian 1 : 35,579341 mm Bagian 2 : 14,094652 mm Bagian 3 : 7,1331675 mm Bagian 4 : 5,8757554 mm Bagian 5 : 21,602538 mm Bagian 6 : 10,176363 mm Bagian 7 : 17,282031 mm | Lendutan yang terjadi : Bagian 1 : 35,579341 mm Bagian 2 : 14,094652 mm Bagian 3 : 17,427935 mm Bagian 4 : 10,505982 mm Bagian 5 : 21,602538 mm Bagian 6 : 18,195563 mm Bagian 7 : 17,282031 mm |
| $\delta_{T(1\ hari)} = -24,359015$ mm | $\delta_{T(1\ minggu)} = -26,31883$ mm | $\delta_{T(1\ bulan)} = -28,67349$ mm |

0.5 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1098,7792 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan :
 $= 296,22085 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 12,256116 \%$

dengan :

$P_i = 2966347 \text{ N}$
 $AP = 578386,2 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,1949827$
 $1-AP/2P_i = 0,9025087$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,1903914$
 $\delta_{camber} = 35,579341 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,094652 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,602538 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,282031 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

Bagian 1 : 35,579341 mm
 Bagian 2 : 14,094652 mm
 Bagian 3 : 31,286903 mm
 Bagian 4 : 16,778152 mm
 Bagian 5 : 21,602538 mm
 Bagian 6 : 29,058487 mm
 Bagian 7 : 17,282031 mm

$\delta_{T(0.5 \text{ tahun})} = -31,949616 \text{ mm}$

1 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1094,543 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan :
 $= 300,4573 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 12,59442 \%$

dengan :

$P_i = 2966347 \text{ N}$
 $AP = 588421,5 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,198366$
 $1-AP/2P_i = 0,900817$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,328457$
 $\delta_{camber} = 35,57934 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,09465 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,60254 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,28203 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

Bagian 1 : 35,57934 mm
 Bagian 2 : 14,09465 mm
 Bagian 3 : 35,51995 mm
 Bagian 4 : 18,72413 mm
 Bagian 5 : 21,60254 mm
 Bagian 6 : 32,42878 mm
 Bagian 7 : 17,28203 mm

$\delta_{T(1 \text{ tahun})} = -33,0328 \text{ mm}$

2 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1090,30627 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan :
 $= 304,693727 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 12,9327243 \%$

dengan :

$P_i = 2966346,97 \text{ N}$
 $AP = 598456,755 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,20174874$
 $1-AP/2P_i = 0,89912563$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,43853373$
 $\delta_{camber} = 35,5793409 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,0946518 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,6025382 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,2820306 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

Bagian 1 : 35,5793409 mm
 Bagian 2 : 14,0946518 mm
 Bagian 3 : 38,8410348 mm
 Bagian 4 : 20,275632 mm
 Bagian 5 : 21,6025382 mm
 Bagian 6 : 35,1158574 mm
 Bagian 7 : 17,2820306 mm

$\delta_{T(2 \text{ tahun})} = -33,950334 \text{ mm}$

3 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1087,8281 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan:
 $= 307,17189 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 13,13062 \%$

dengan :

$P_i = 2966347 \text{ N}$
 $AP = 604327,02 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,2037277$
 $1-AP/2P_i = 0,8981362$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,4902399$
 $\delta_{camber} = 35,579341 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,094652 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,602538 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,282031 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

| | |
|------------|--------------|
| Bagian 1 : | 35,579341 mm |
| Bagian 2 : | 14,094652 mm |
| Bagian 3 : | 40,372257 mm |
| Bagian 4 : | 21,004412 mm |
| Bagian 5 : | 21,602538 mm |
| Bagian 6 : | 36,37805 mm |
| Bagian 7 : | 17,282031 mm |

$\delta_{T(3 \text{ tahun})} = -34,410085 \text{ mm}$

4 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1086,0698 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan :
 $= 308,93017 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 13,271029 \%$

dengan :

$P_i = 2966347 \text{ N}$
 $AP = 608492,03 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,2051318$
 $1-AP/2P_i = 0,8974341$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,5217229$
 $\delta_{camber} = 35,579341 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,094652 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,602538 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,282031 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

| | |
|------------|--------------|
| Bagian 1 : | 35,579341 mm |
| Bagian 2 : | 14,094652 mm |
| Bagian 3 : | 41,290334 mm |
| Bagian 4 : | 21,448155 mm |
| Bagian 5 : | 21,602538 mm |
| Bagian 6 : | 37,146578 mm |
| Bagian 7 : | 17,282031 mm |

$\delta_{T(4 \text{ tahun})} = -34,704279 \text{ mm}$

6 Tahun

Tegangan efektif :
 $f_{pe} = 1083,591674 \text{ Mpa}$

Total kehilangan tegangan :
 $= 311,4083262 \text{ Mpa}$

Prosentase kehilangan tegangan :
 $= 13,46892391 \%$

dengan :

$P_i = 2966346,974 \text{ N}$
 $AP = 614362,2973 \text{ N}$
 $AP/P_i = 0,207110733$
 $1-AP/2P_i = 0,896444633$
 $b_s = 1,13$
 $k_r = 1$
 $C_t = 1,559485832$
 $\delta_{camber} = 35,57934085 \text{ mm}$
 $\delta_D = 14,09465176 \text{ mm}$
 $\delta_{SD} = 21,60253823 \text{ mm}$
 $\delta_L = 17,28203058 \text{ mm}$

Lendutan yang terjadi :

| | |
|------------|----------------|
| Bagian 1 : | 35,57934085 mm |
| Bagian 2 : | 14,09465176 mm |
| Bagian 3 : | 42,37079559 mm |
| Bagian 4 : | 21,98040973 mm |
| Bagian 5 : | 21,60253823 mm |
| Bagian 6 : | 38,06840311 mm |
| Bagian 7 : | 17,28203058 mm |

$\delta_{T(6 \text{ tahun})} = -35,07789697 \text{ mm}$

8 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1081,83339 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 313,166608 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,6093329 \%$$

dengan :

$$P_i = 2966346,97 \text{ N}$$

$$AP = 618527,315 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,20851482$$

$$1-AP/2P_i = 0,89574259$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,58208425$$

$$\delta_{camber} = 35,5793409 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 14,0946518 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,6025382 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 17,2820306 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,5793409 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 14,0946518 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 43,0020957 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 22,2989265 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,6025382 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 38,6200501 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 17,2820306 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(4 \text{ tahun})} = -35,316761 \text{ mm}$$

10 Tahun

Tegangan efektif :

$$f_{pe} = 1080,46956 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan tegangan :

$$= 314,530437 \text{ Mpa}$$

Prosentase kehilangan tegangan :

$$= 13,7182425 \%$$

dengan :

$$P_i = 2966346,97 \text{ N}$$

$$AP = 621757,953 \text{ N}$$

$$AP/P_i = 0,20960392$$

$$1-AP/2P_i = 0,89519804$$

$$b_s = 1,13$$

$$k_r = 1$$

$$C_t = 1,5974812$$

$$\delta_{camber} = 35,5793409 \text{ mm}$$

$$\delta_D = 14,0946518 \text{ mm}$$

$$\delta_{SD} = 21,6025382 \text{ mm}$$

$$\delta_L = 17,2820306 \text{ mm}$$

Lendutan yang terjadi :

$$\text{Bagian 1 : } 35,5793409 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 2 : } 14,0946518 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 3 : } 43,4230953 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 4 : } 22,5159411 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 5 : } 21,6025382 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 6 : } 38,9959029 \text{ mm}$$

$$\text{Bagian 7 : } 17,2820306 \text{ mm}$$

$$\delta_{T(4 \text{ tahun})} = -35,488628 \text{ mm}$$

LAMPIRAN 2

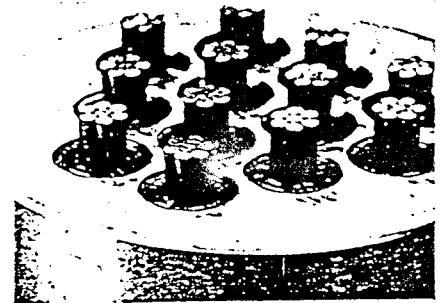
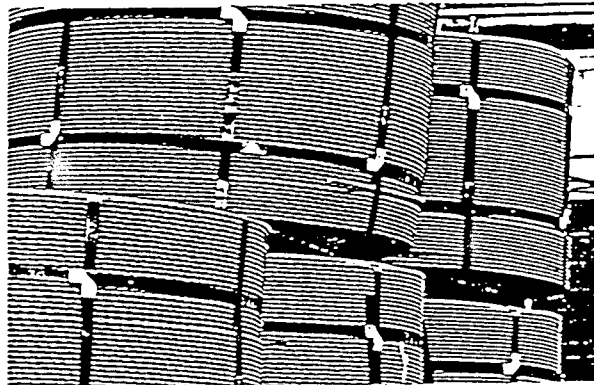
Data-data
KabeI & Angkur - London



Strand Properties

| Strand type | 13 mm (0.5") | | 15 mm (0.6") | |
|--|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | Euronorm 138-79 or BS 5896: 1980 Super | ASTM A 416-85 Grade 270 | Euronorm 138-79 or BS 5896: 1980 Super | ASTM A 416-85 Grade 270 |
| Nominal diameter (mm) | 12.9 | 12.7 | 15.7 | 15.2 |
| Nominal area (mm ²) | 100 | 98.7 | 150 | 140 |
| Nominal mass (kg/m) | 0.785 | 0.775 | 1.18 | 1.10 |
| Yield strength (MPa) | 1580 ¹⁾ | 1670 ²⁾ | 1500 ¹⁾ | 1670 ²⁾ |
| Tensile strength (MPa) | 1860 | 1860 | 1770 | 1860 |
| Min. breaking load P _b (kN) | 186.0 | 183.7 | 255.0 | 260.7 |
| Young's modulus (GPa) | circa 195 | | | |
| Relaxation ³⁾ after 1000 h at 20°C and 0.7 x P _b (%) | max. 2.5 | | | |

- 1) Measured at 0.1% residual strain (0.1% offset method)
- 2) Measured at 1.0% extension (1% extension under load method)
- 3) Valid for relaxation class 2 acc. to Euronorm 138-79/BS 5896: 1980, or low relaxation grade acc. to ASTM A 416-85



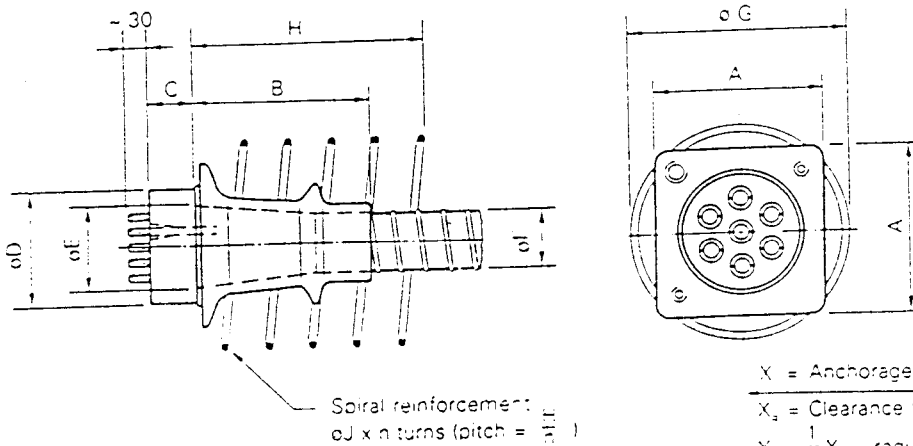
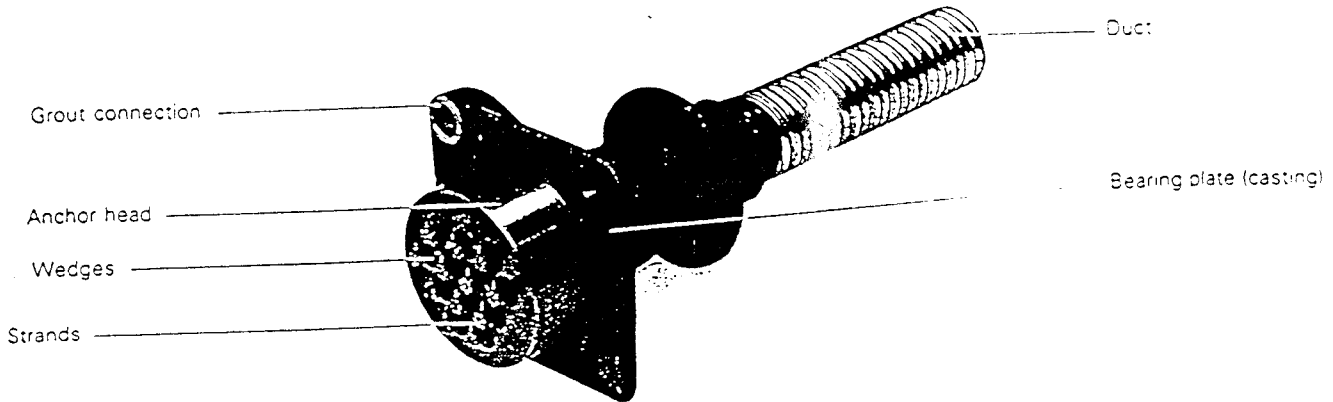
Tendon Properties

| 13 mm (0.5") strand | | | | |
|---------------------|-------------------|--|---|---|
| Tendon unit | Number of strands | Duct diameter ¹⁾ internal/external (mm) | Min. breaking load | |
| | | | Strand type Euronorm 138-79 or BS 5896: 1980 Super (kN) | Strand type ASTM A416-85 Grade 270 (kN) |
| 5-1 | 1 | 25/30 | 186 | 184 |
| 5-2 | 2 | 40/45 | 372 | 367 |
| 5-3 | 3 | 40/45 | 558 | 551 |
| 5-4 | 4 | 45/50 | 744 | 735 |
| 5-6 ²⁾ | 6 | 50/55 | 1116 | 1102 |
| 5-7 | 7 | 55/60 | 1302 | 1296 |
| 5-12 | 12 | 65/72 | 2232 | 2204 |
| 5-18 ²⁾ | 18 | 80/87 | 3348 | 3307 |
| 5-19 | 19 | 80/87 | 3534 | 3490 |
| 5-22 | 22 | 85/92 | 4092 | 4041 |
| 5-31 | 31 | 100/107 | 5766 | 5695 |
| 5-37 | 37 | 120/127 | 6882 | 6797 |
| 5-43 | 43 | 130/137 | 7998 | 7899 |
| 5-55 | 55 | 140/150 | 10230 | 10104 |

| 15 mm (0.6") strand | | | | |
|---------------------|-------------------|--|---|---|
| Tendon unit | Number of strands | Duct diameter ¹⁾ internal/external (mm) | Min. breaking load | |
| | | | Strand type Euronorm 138-79 or BS 5896: 1980 Super (kN) | Strand type ASTM A416-85 Grade 270 (kN) |
| 6-1 | 1 | 30/35 | 265 | 261 |
| 6-2 | 2 | 45/50 | 530 | 521 |
| 6-3 | 3 | 45/50 | 795 | 782 |
| 6-4 | 4 | 50/55 | 1060 | 1043 |
| 6-6 ²⁾ | 6 | 60/67 | 1590 | 1564 |
| 6-7 | 7 | 60/67 | 1855 | 1825 |
| 6-12 | 12 | 80/87 | 3180 | 3128 |
| 6-18 ²⁾ | 18 | 95/102 | 4770 | 4693 |
| 6-19 | 19 | 95/102 | 5035 | 4953 |
| 6-22 | 22 | 110/117 | 5830 | 5735 |
| 6-31 | 31 | 130/137 | 8215 | 8082 |
| 6-37 | 37 | 140/150 | 9805 | 9646 |
| 6-43 | 43 | 150/160 | 11395 | 11210 |
| 6-55 | 55 | 170/180 | 14575 | 14339 |

- 1) Standard size for corrugated steel ducts. For polyethylene ducts PT-PLUS[®] see page 6
- 2) For intermediate stressing anchorages type 2

Stressing Anchorage VSL Type EC



X = Anchorage spacing
 X_1 = Clearance to edge
 $X_2 = \frac{1}{2} X +$ required cover of spiral reinforcement

| | Tendon unit | A | B | C | ϕD | ϕE | ϕF internal/external | ϕG | H | ϕJ | n | X^2 |
|--------------------------|-------------|-----|-----|-----|----------|----------|----------------------------|----------|-----|----------|---|-------|
| Strand type 13 mm (0.5") | 5-3 | 120 | 130 | 50 | 90 | 50 | 40/45 | 130 | 150 | 10 | 3 | 155 |
| | 5-4 | 135 | 125 | 50 | 95 | 55 | 45/50 | 160 | 150 | 10 | 3 | 180 |
| | 5-7 | 165 | 155 | 55 | 110 | 74 | 55/60 | 205 | 200 | 12 | 4 | 235 |
| | 5-12 | 215 | 215 | 60 | 150 | 104 | 65/72 | 295 | 250 | 14 | 5 | 305 |
| | 5-19 | 270 | 265 | 75 | 180 | 135 | 80/87 | 365 | 300 | 16 | 6 | 385 |
| | 5-22 | 290 | 335 | 85 | 190 | 150 | 85/92 | 395 | 360 | 18 | 6 | 415 |
| | 5-31 | 340 | 365 | 95 | 230 | 172 | 100/107 | 470 | 400 | 18 | 8 | 490 |
| | 5-37 | 370 | 360 | 105 | 240 | 188 | 120/127 | 510 | 420 | 20 | 7 | 535 |
| | 5-55 | 430 | 460 | 130 | 290 | 230 | 140/150 | 620 | 540 | 22 | 9 | 655 |
| Strand type 15 mm (0.6") | 6-3 | 135 | 125 | 50 | 90 | 55 | 45/50 | 160 | 150 | 10 | 3 | 185 |
| | 6-4 | 150 | 155 | 55 | 110 | 65 | 50/55 | 190 | 200 | 12 | 4 | 210 |
| | 6-7 | 190 | 170 | 60 | 135 | 84 | 60/67 | 260 | 250 | 14 | 5 | 280 |
| | 6-12 | 250 | 245 | 75 | 170 | 118 | 80/87 | 345 | 300 | 16 | 6 | 365 |
| | 6-19 | 310 | 305 | 95 | 200 | 150 | 95/102 | 440 | 350 | 18 | 7 | 460 |
| | 6-22 | 340 | 365 | 100 | 220 | 172 | 110/117 | 470 | 400 | 18 | 8 | 495 |
| | 6-31 | 390 | 350 | 120 | 260 | 192 | 130/137 | 560 | 480 | 20 | 8 | 590 |
| | 6-37 | 430 | 450 | 135 | 290 | 215 | 140/150 | 610 | 540 | 22 | 9 | 640 |
| | 6-55 | 520 | 530 | 160 | 340 | 255 | 170/180 | 740 | 630 | 26 | 9 | 780 |

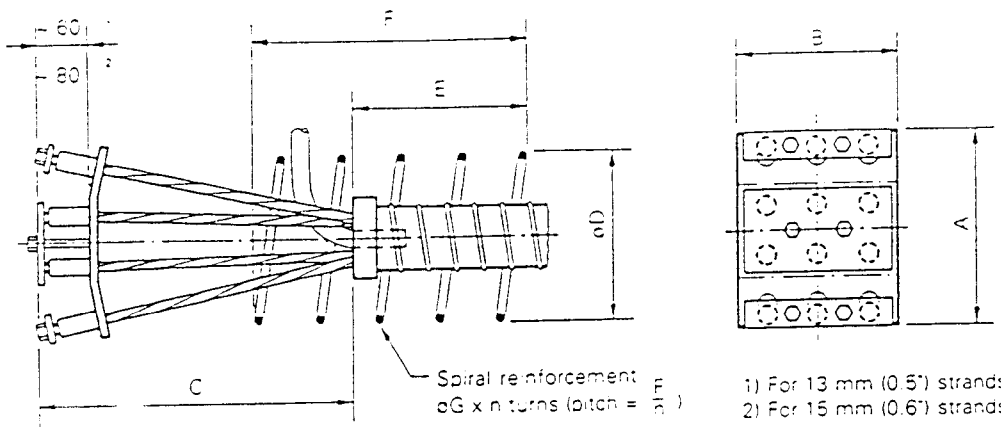
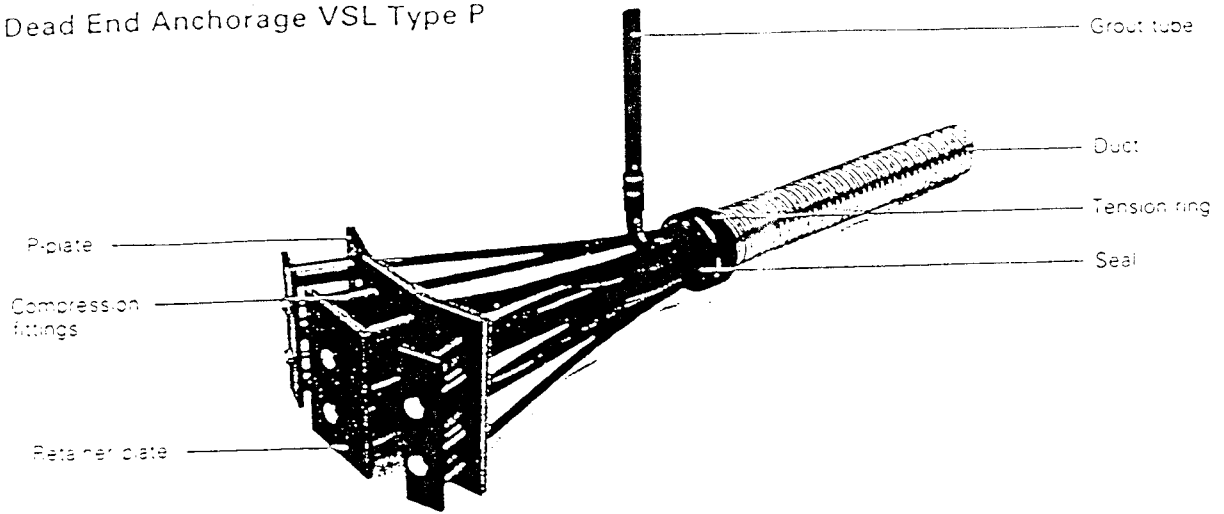
Subject to modification

Dimensions in mm

- Standard diameter for corrugated steel duct. For polyethylene ducts PT-PLUS™ see page 6.
 - Anchorage spacings are in accordance with test requirements of CEB/FIP (Recommendations for acceptance and application of post-tensioning systems; March 1981). Modifications to these values may be possible.
- Dimensions are valid for:
 Nominal concrete strength at 28 days: 35 MPa (cube) 28 MPa (cylinder)

Maximum prestressing force may be applied when concrete reaches 90 % of its nominal strength.
 Max. prestressing force is 75 % of min. tendon breaking load (temporary overstressing to 80 %).
 Dimensions for other concrete strengths on request.
 Yield strength of spiral reinforcement: ≥ 420 MPa.
 Spirals may be replaced by suitable orthogonal reinforcement.

Dead End Anchorage VSL Type P



Where the force must be transferred into the concrete exclusively via the bearing plate, polyethylene tubes may be used for sheathing the strands between the end of the duct and the bearing plate.

| Strand type 13 mm (0.5") | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-----|-----|------|----------|-----|-----|----------|---|
| Tendon unit | Alternative | A | B | C | ϕD | E | F | ϕG | n |
| 5-3 | | 190 | 60 | 260 | 130 | 90 | 190 | 8 | 4 |
| 5-4 | 1 | 120 | 120 | 360 | 130 | 90 | 190 | 8 | 4 |
| | 2 | 230 | 65 | 360 | 130 | 90 | 190 | 8 | 4 |
| 5-7 | | 230 | 110 | 360 | 180 | 100 | 250 | 12 | 4 |
| 5-12 | | 230 | 190 | 410 | 200 | 140 | 320 | 14 | 5 |
| 5-19 | | 300 | 230 | 510 | 230 | 140 | 320 | 14 | 5 |
| 5-22 | | 350 | 230 | 610 | 300 | 140 | 320 | 16 | 5 |
| 5-31 | | 500 | 230 | 810 | 300 | 140 | 320 | 16 | 5 |
| 5-37 | 1 | 600 | 230 | 960 | 350 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| | 2 | 470 | 300 | 810 | 350 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| 5-43 | 1 | 690 | 230 | 1010 | 400 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| | 2 | 530 | 300 | 860 | 400 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| 5-55 | 1 | 980 | 230 | 1310 | 400 | 170 | 380 | 20 | 6 |
| | 2 | 600 | 360 | 910 | 400 | 170 | 380 | 20 | 6 |

Dimensions in mm
 Dimensions are valid for
 Nominal concrete strength at 28 days: 35 MPa (cube), 28 MPa (cylinder).
 Maximum prestressing force may be applied when concrete reaches 80 % of its nominal strength.

| Strand type 15 mm (0.6") | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|------|-----|------|----------|-----|-----|----------|---|
| Tendon unit | Alternative | A | B | C | ϕD | E | F | ϕG | n |
| 6-2 | | 180 | 60 | 280 | 130 | 90 | 190 | 8 | 4 |
| 6-3 | | 230 | 70 | 330 | 180 | 100 | 250 | 12 | 4 |
| 6-4 | 1 | 260 | 80 | 430 | 180 | 100 | 250 | 12 | 4 |
| | 2 | 145 | 145 | 380 | 180 | 100 | 250 | 12 | 4 |
| 6-7 | | 270 | 140 | 430 | 200 | 140 | 320 | 14 | 5 |
| 6-12 | | 270 | 230 | 430 | 230 | 140 | 320 | 14 | 5 |
| 6-19 | | 370 | 270 | 630 | 300 | 140 | 320 | 16 | 5 |
| 6-22 | | 420 | 270 | 730 | 300 | 140 | 320 | 16 | 5 |
| 6-31 | 1 | 600 | 270 | 980 | 400 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| | 2 | 480 | 340 | 780 | 400 | 170 | 380 | 18 | 6 |
| 6-37 | 1 | 720 | 270 | 1180 | 400 | 170 | 380 | 20 | 6 |
| | 2 | 560 | 340 | 980 | 400 | 170 | 380 | 20 | 6 |
| 6-43 | 1 | 800 | 270 | 1280 | 400 | 200 | 440 | 20 | 7 |
| | 2 | 650 | 340 | 1080 | 400 | 200 | 440 | 20 | 7 |
| 6-55 | 1 | 1000 | 270 | 1780 | 460 | 220 | 500 | 22 | 8 |
| | 2 | 800 | 340 | 1280 | 460 | 220 | 500 | 22 | 8 |

Subject to modification
 Max. prestressing force is 75 % of min. tendon breaking load (temporary overstressing to 80 %).
 Dimensions for other concrete strengths on request.
 Yield strength of spiral reinforcement: ≥ 420 MPa.
 Spirals may be replaced by a suitable orthogonal reinforcement.