



021/BM/2011

MANUAL

Konstruksi dan Bangunan

Perencanaan Struktur Beton Pratekan
Untuk Jembatan



DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA

TERKENDALI

PRAKATA

Salah satu aspek penting untuk menunjang keberhasilan pembinaan dibidang Jembatan adalah dengan tersedianya Norma, Standar, Pedoman dan Manual (NSPM) ,yang dapat di terapkan di lapangan dengan mudah.

Untuk mengatasi permasalahan di atas, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum telah menyusun Manual Perencanaan Struktur Beton Pratekan untuk Jembatan

Manual ini disusun dengan proses pembahasan beberapa tim ahli yang berkompeten dibidang pekerjaan jembatan, Pedoman teknik ini berisikan mengenai buku acuan bagi para perencana. Secara garis besar, standar ini berisikan penjabaran konsep metodologi dan tahapan perencanaan, yang disertai contoh-contoh perhitungan elemen struktur beton prategang pada jembatan.

Apabila dalam pelaksanaan ditemui adanya kekurangan ataupun terdapat kekeliruan pada manual ini, mohon saran dan kritik dapat disampaikan untuk perbaikan dan penyempurnaan dikemudian hari.

Jakarta, Desember 2011

DIREKTUR JENDERAL BINA MARGA


Ir. DJOKO MURANTO, MSc

DAFTAR ISI

Prakata	i
Daftar Isi	ii

1 PENDAHULUAN

1.1 Ruang Lingkup Desain	1-1
1.2 Acuan Normatif	1-1
1.3 Definisi dan Istilah	1-3
1.4 Konsep Dasar	1-8
1.5 Keuntungan Beton Pratekan	1-16
1.6 Material Beton Prategang	1-17
1.6.1 Beton	1-17
1.6.2 Tulangan Prategang	1-25
1.7 Sistem Penegangan	1-29

2 PERENCANAAN BERDASARKAN BATAS LAYAN (PBL)

2.1 Umum	2-1
2.2 Tegangan Izin	2-1
2.2.1 Tegangan izin tekan pada kondisi layan	2-1
2.2.2 Tegangan izin tekan pada kondisi beban sementara atau kondisi transfer gaya prategang.	2-1
2.2.3 Tegangan izin tarik pada kondisi batas layan,	2-2
2.2.4 Tegangan izin tarik pada kondisi transfer gaya prategang,	2-2
2.3 Perjanjian Tanda	2-4
2.4 Rumus Umum Perhitungan Tegangan	2-6
2.5 Profil Kabel	2-9
2.5.1 Garis tekanan atau C-line	2-9
2.5.2 Central kern versus limit kern	2-10
2.5.3 Daerah aman kabel	2-11
2.6 Lendutan dan camber	2-14

3	PERENCANAAN BERDASARKAN BATAS KEKUATAN TERFAKTOR (PBKT)	
3.1	Umum	3-1
3.2	Momen nominal lentur, M_n	3-3
3.2.1	Momen Nominal Penampang persegi	3-5
3.2.2	Momen Nominal Penampang Berflens	3-6
3.2.3	Penampang Komposit	3-6
3.2.4	Menentukan Tegangan Nominal Baja Prategang pada Saat Runtuh, f_{ps}	3-7
3.2.5	Preliminari Desain Ultimate	3-10
3.2.6	Langkah-Langkah Desain Member Prategang Kondisi Ultimate	3-11
3.2.7	Contoh Perhitungan Desain Member Prategang Kondisi Ultimate	3-13
3.3	Perencanaan Balok Terhadap Geser	3-24
3.3.1	Kekuatan Geser Batas Nominal	3-24
3.3.2	Kekuatan Geser Batas Yang Disumbangkan Oleh Beton	3-24
3.3.3	Kekuatan Geser Batas Yang Disumbangkan oleh Tulangan Geser	3-26
3.3.4	Kekuatan Geser Batas Rencana	3-26
3.3.5	Gaya Geser Maksimum Di Dekat Tumpuan	3-26
3.3.6	Tulangan geser minimum	3-27
3.3.7	Persyaratan tulangan geser	3-27
3.4	Daerah pengangkuran untuk angkur prategang	3-37
3.4.1	Angkur untuk komponen prategang pasca tarik	3-37
3.4.2	Pembebanan yang diperhitungkan	3-37
3.4.3	Perhitungan gaya tarik sepanjang garis kerja gaya angkur	3-38
3.4.4	Jumlah dan distribusi tulangan	3-38
3.4.5	Angkur Untuk Komponen Prategang Pratarik	3-39
3.4.6	Detail penulangan khusus pada daerah pengangkuran	3-39
3.4.7	Panjang penyaluran untuk tendon pratarik	3-40
3.4.8	Penyaluran tegangan tendon pasca tarik dengan pengangkuran	3-40
4	KEHILANGAN PRATEGANG	
4.1	Umum	4-1
4.2	Kehilangan Akibat Friksi	4-1
4.3	Kehilangan Akibat Slip Pengangkuran	4-6

4.4 Kehilangan Akibat Pemendekan Beton	4-9
4.5 Kehilangan Akibat Susut Beton	4-16
4.6 Kehilangan Akibat Rangkak Beton	4-21
4.7 Kehilangan Akibat Relaksasi	4-25
4.8 Kehilangan Total	4-28

5 ANALISIS STRUKTUR

5.1 Umum	5-1
5.2 Struktur Statis Tertentu (ST)	5-1
5.3 Struktur Statis Tak Tentu (STT)	5-5
5.3.1 Kerugian Kontinuitas Prategang	5-7
5.3.2 Metode Perhitungan	5-8
5.3.3 Teorema 3 Momen (Clapeyron)	5-8
5.3.4 Distribusi Momen Cross	5-17
5.3.5 Penampang Non Prismatic	5-24
5.3.6 Konsep Beban Ekuivalen	5-42

Lampiran

1 PENDAHULUAN

1.1 Ruang Lingkup Desain

Pedoman ini merupakan pedoman teknis perencanaan beton prategang untuk jembatan atau struktur lainnya yang mempunyai kesamaan karakteristik dengan jembatan.

1.2 Acuan Normatif

SNI T-02-2005, *Pembebanan untuk Jembatan, Kepmen PU No. 498/KPTS/M/2005.*

SNI T-12-2004, *Perencanaan struktur beton untuk jembatan, Kepmen PU No. 360/KPTS/M/2004.*

BMS 1992, *Tata cara perencanaan jembatan.*

AASHTO 2004, *Spesifikasi standar untuk jembatan.*

SNI 03-2847-2003, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*

SNI 03-2461-1991, *Spesifikasi agregat ringan untuk beton struktur.*

SNI 03-2834-1992, *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.*

SNI 03-3403-1994, *Metode pengujian kuat tekan beton inti.*

SNI 03-4433-1997, *Spesifikasi beton siap pakai.*

SNI 03-4810-1998, *Metode pembuatan dan perawatan benda uji di lapangan.*

SNI 15-2049-1994, *Semen portland.*

ANSI/AWS D1.4, *Tata cara pengelasan – Baja tulangan.*

MNL 120-04 PCI Design Handbook

ASTM A 416M, *Standar spesifikasi untuk strand baja, tujuh kawat tanpa lapisan untuk beton prategang.*

ASTM A 421, *Standar spesifikasi untuk kawat baja penulangan - Tegangan tanpa pelapis untuk beton prategang.*

ASTM A 496-94, *Standar spesifikasi untuk kawat baja untuk beton bertulang.*

ASTM A 722, *Standar spesifikasi untuk baja tulangan mutu tinggi tanpa lapisan untuk beton prategang.*

ASTM A 82, Standar spesifikasi untuk kawat tulangan polos untuk penulangan beton.

ASTM C 1017, Standar spesifikasi untuk bahan tambahan kimiawi untuk menghasilkan beton dengan kelecakan yang tinggi.

ASTM C 109, Metode uji kuat tekan untuk mortar semen hidrolis.

ASTM C 109-93, Standar metode uji kuat tekan mortar semen hidrolis (menggunakan benda uji kubus 50 mm).

ASTM C 1240, Standar spesifikasi untuk silica fume untuk digunakan pada beton dan mortar semen-hidrolis.

ASTM C 31-91, Standar praktis untuk pembuatan dan pemeliharaan benda uji beton di lapangan.

ASTM C 33, Standar spesifikasi agregat untuk beton.

ASTM C 33-93, Standar spesifikasi untuk agregat beton.

ASTM C 39-93a, Standar metode uji untuk kuat tekan benda uji silinder beton.

ASTM C 42-90, Standar metode pengambilan dan uji beton inti dan pemotongan balok beton.

ASTM C 494, Standar spesifikasi bahan tambahan kimiawi untuk beton.

ASTM C 595, Standar spesifikasi semen blended hidrolis.

ASTM C 618, Standar spesifikasi untuk abu terbang dan pozzolan alami murni atau terkalsinasi untuk digunakan sebagai bahan tambahan mineral pada beton semen portland.

1.3 Definisi dan Istilah

beban hidup

semua beban yang terjadi akibat penggunaan jembatan berupa beban lalu lintas kendaraan sesuai dengan peraturan pembebanan untuk jembatan jalan raya yang berlaku.

beban kerja

beban layan rencana yang digunakan untuk merencanakan komponen struktur

beban mati

beban semua bagian dari suatu jembatan yang bersifat tetap, termasuk segala beban tambahan yang tidak terpisahkan dari suatu struktur jembatan.

beban terfaktor

beban kerja merupakan beban yang telah dikalikan dengan faktor beban yang sesuai

beton

campuran antara semen portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat

beton bertulang

beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa pratekan, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja

beton-normal

beton yang mempunyai berat satuan 2200 kg/m^3 sampai 2500 kg/m^3 dan dibuat menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah

beton polos

beton tanpa tulangan atau mempunyai tulangan tetapi kurang dari ketentuan minimum

beton pracetak

elemen atau komponen beton tanpa atau dengan tulangan yang dicetak terlebih dahulu sebelum dirakit menjadi bangunan

beton pratekan

beton bertulang yang telah diberikan tegangan tekan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat beban kerja

friksi kelengkungan

friksi yang diakibatkan oleh bengkokan atau lengkungan di dalam profil tendon prategang yang disyaratkan

friksi wobble

friksi yang disebabkan oleh adanya penyimpangan yang tidak disengaja pada penempatan selongsong prategang dari kedudukan yang seharusnya

gaya jacking

gaya sementara yang ditimbulkan oleh alat yang mengakibatkan terjadinya tarik pada tendon dalam beton prategang

kolom

komponen struktur dengan rasio tinggi terhadap dimensi lateral terkecil melebihi 3 yang digunakan terutama untuk mendukung kombinasi beban aksial dan lentur

komponen struktur lentur beton komposit

komponen struktur lentur beton yang dibuat secara pracetak dan/atau yang dicor di tempat, yang masing-masing bagian komponennya dibuat secara terpisah, tetapi saling dihubungkan sedemikian hingga semua bagian komponen bereaksi terhadap beban kerja sebagai suatu kesatuan

kuat nominal

kekuatan suatu komponen struktur atau penampang yang dihitung berdasarkan ketentuan dan asumsi metode perencanaan sebelum dikalikan dengan nilai faktor reduksi kekuatan yang sesuai

kuat perlu

kekuatan suatu komponen struktur atau penampang yang diperlukan untuk menahan beban terfaktor atau momen dan gaya dalam yang berkaitan dengan beban tersebut dalam suatu kombinasi seperti yang ditetapkan dalam tata cara ini

kuat rencana

kuat nominal dikalikan dengan suatu faktor reduksi kekuatan ϕ

kuat tekan beton yang disyaratkan (f'_c)

kuat tekan beton yang ditetapkan oleh perencana struktur (benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm), untuk dipakai dalam perencanaan struktur beton, dinyatakan dalam satuan MPa. Bila nilai f'_c di dalam tanda akar, maka hanya nilai numerik dalam tanda akar saja yang dipakai, dan hasilnya tetap mempunyai satuan MPa

modulus elastisitas

rasio tegangan normal tarik atau tekan terhadap regangan yang timbul akibat tegangan tersebut. Nilai rasio ini berlaku untuk tegangan di bawah batas proporsional material

panjang penanaman

panjang tulangan tertanam yang tersedia dari suatu tulangan diukur dari suatu penampang kritis

panjang penyaluran

panjang tulangan tertanam yang diperlukan untuk mengembangkan kuat rencana tulangan pada suatu penampang kritis

pasca tarik

cara pemberian tarikan, dalam sistem prategang dimana tendon ditarik sesudah beton mengeras

perangkat angkur

perangkat yang digunakan pada sistem prategang pasca tarik untuk menyalurkan gaya pasca tarik dari tendon ke beton

perangkat angkur *strand* tunggal

perangkat angkur yang digunakan untuk strand tunggal atau batang tunggal berdiameter 16 mm atau kurang yang memenuhi ketentuan yang berlaku

perangkat angkur *strand* majemuk

perangkat angkur yang digunakan untuk strand, batang atau kawat majemuk, atau batang tunggal berdiameter lebih besar daripada 16 mm, yang memenuhi ketentuan lain yang berlaku

pratarik

pemberian gaya prategang dengan menarik tendon sebelum beton dicor

prategang efektif

tegangan yang masih bekerja pada tendon setelah semua kehilangan tegangan terjadi, di luar pengaruh beban mati dan beban tambahan

sengkang

tulangan yang digunakan untuk menahan tegangan geser dan torsi dalam suatu komponen struktur, terbuat dari batang tulangan, kawat baja atau jaring kawat baja las polos atau ulir, berbentuk kaki tunggal atau dibengkokkan dalam bentuk L, U atau persegi dan dipasang tegak lurus atau membentuk sudut, terhadap tulangan longitudinal, dipakai pada komponen struktur lentur balok

sengkang ikat

sengkang tertutup penuh yang dipakai pada komponen struktur tekan, kolom

tegangan

intensitas gaya per satuan luas

tendon

elemen baja misalnya kawat baja, kabel batang, kawat untai atau suatu bundel dari elemen-elemen tersebut, yang digunakan untuk memberi gaya pratekan pada beton

tendon dengan lekatan

tendon prategang yang direkatkan pada beton baik secara langsung ataupun dengan cara *grouting*

tinggi efektif penampang (d)

jarak yang diukur dari serat tekan terluar hingga titik berat tulangan tarik

transfer

proses penyaluran tegangan dalam tendon prategang dari *jack* atau perangkat angkur pasca tarik kepada komponen struktur beton

tulangan

batang baja berbentuk polos atau berbentuk ulir atau berbentuk pipa yang berfungsi untuk menahan gaya tarik pada komponen struktur beton, tidak termasuk tendon prategang, kecuali bila secara khusus diikuti sertakan

tulangan polos

batang baja yang permukaan sisi luarnya rata, tidak bersirip dan tidak berukir

tulangan ulir

batang baja yang permukaan sisi luarnya tidak rata, tetapi bersirip atau berukir

tulangan spiral

tulangan yang dililitkan secara menerus membentuk suatu ulir lingkaran silindris

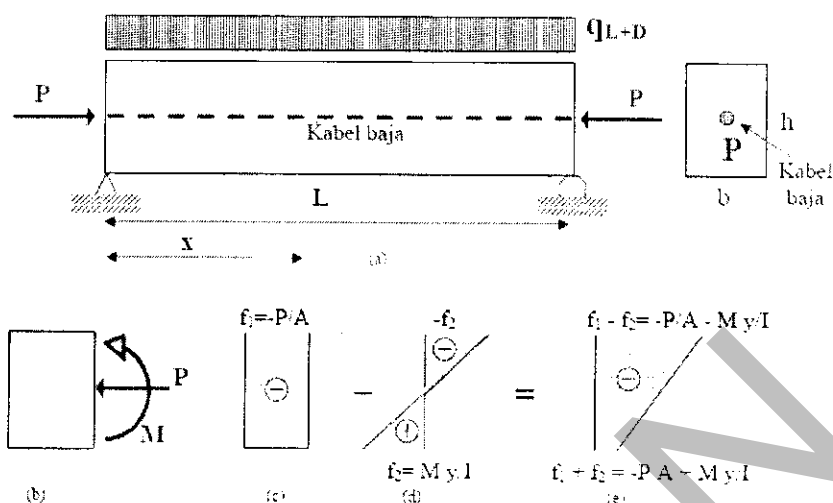
zona angkur

bagian komponen struktur prategang pasca tarik dimana gaya pratekan terpusat disalurkan ke beton dan disebarkan secara lebih merata ke seluruh bagian penampang. Panjang daerah zona angkur ini adalah sama dengan dimensi terbesar penampang. Untuk perangkat angkur tengah, zona angkur mencakup daerah terganggu di depan dan di belakang perangkat angkur tersebut

1.4 Konsep Dasar

Beton lebih kuat dalam kondisi tekan, namun lemah dalam kondisi tarik. Kekuatan tariknya bervariasi antara 8 sampai 14 persen dari kekuatan tekannya. Kekurangan material beton yang lemah dalam tarik ini dapat diatasi dengan memberi tegangan tekan untuk mengimbangi/ mengurangi tegangan tarik yang timbul pada bagian penampang akibat beban yang bekerja.

Pemberian tegangan tekan ini dilakukan dengan memasukkan kabel dari material jenis baja mutu tinggi kedalam beton sebesar gaya penegangan tertentu, kemudian setelah beton mengeras gaya ditransfer ke beton tersebut. Penampang beton yang terjadi bisa seluruhnya tertekan atau hanya sebagian saja yang tertekan tergantung kebutuhan syarat keamanan dan kelayakan atau ketentuan perencanaan lainnya misalnya faktor ekonomi. Aplikasi prategang dapat ditunjukkan dengan ilustrasi sebagai berikut :



Gambar 1-1 Aplikasi Prategang pada Balok Bentang Sederhana

Momen yang terjadi akibat beban mati dan beban hidup pada tengah bentang

$$M_{D+L} = 1/8 q_D L^2 + 1/8 q_L L^2$$

Keterangan :

q_D = beban merata akibat beban mati

q_L = beban merata akibat beban hidup

Tegangan akibat prategang P

$$f_1 = \frac{P}{A} \quad (1-1)$$

Tegangan akibat momen M_{D+L} (Tegangan yang menekan serat atas adalah positif)

$$f_2 = \frac{M_{D+L} \cdot y}{I} \quad (1-2)$$

Dimana,

y = jarak dari titik berat penampang ke serat yang ditinjau;

I = momen inersia penampang,

A = luas penampang,

Seperti yang terlihat pada gambar 1-1 penampang beton yang diaplikasikan beban merata akibat beban mati dan beban hidup (gambar 1-1(a)) akan menyebabkan momen, $M = M_{D+L}$ ditengah bentang (gambar 1-1(b)). Momen ini akan menyebabkan serat bawah beton tertarik atau tegangan bernilai positif (gambar 1-1(d)). Adapun gaya

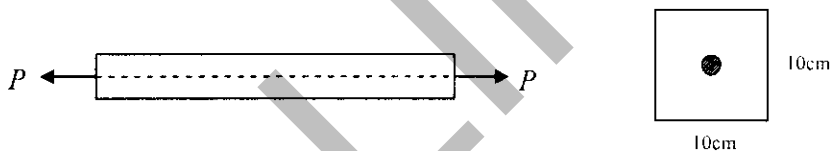
prategang yang diaplikasikan pada beton ini menyebabkan penampang beton tertekan atau tegangan bernilai negatif (gambar 1-1(b)). Bila nilai tegangan dijumlahkan maka tegangan pada serat bagian atas tertekan dan serat bagian bawah tegangan tarik yang terjadi bisa sangat kecil atau mungkin negatif atau menjadi tekan (gambar 1-1(d)).

Secara umum beton prategang pada jembatan utamanya lebih banyak digunakan untuk elemen struktur lentur seperti balok dan pelat. namun selain daripada itu beton prategang dapat juga digunakan untuk elemen tekan maupun tarik, seperti kolom, tiang-tiang pondasi.

Perbedaan beton biasa (*reinforced concrete*) dengan beton pratekan (*prestressed concrete*) dapat dijelaskan dengan contoh berikut ini.

A. Perbandingan dalam kekuatan aksial.

Ambil suatu contoh balok beton dengan penampang bujur sangkar 10 cm x 10 cm yang ditarik sentris oleh sebuah gaya P .



1) Kekuatan aksial beton polos (tanpa tulangan)

Bila diketahui kekuatan tarik beton $f_t = 4 \text{ N/mm}^2$, maka beton akan putus pada saat gaya $P = 4 \text{ N/mm}^2 \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} = 40000 \text{ N}$.

2) Kekuatan aksial beton bertulang

Bila balok tersebut diberi satu batang tulangan baja diameter D25 (luas tulangan $A_s = 4,90 \text{ cm}^2$), maka kekuatan tarik beton dihitung sebagai berikut:

Perbandingan modulus elastisitas baja dan beton anggap $= E_s/E_c = 6$.

Gaya aksial yang dipikul oleh penampang transformasi dihitung sebagai berikut

$$P = 4 \text{ N/mm}^2 \times (100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} + (6-1) \times 490 \text{ mm}^2) = 49800 \text{ kgf.}$$

Kekuatan meningkat $49800/40000=1.245$ (peningkatan 125 %)

3) Kekuatan aksial beton prategang

Bila balok tersebut diberi tegangan pra-tarik yang dipertahankan sebesar $F_{ps}=120 \text{ MPa}$ dengan tendon dari 5 batang tulangan prategang diameter 12.7 mm (luas tulangan efektif $A_{ps} = 5 \times 98 \text{ mm}^2 = 490 \text{ mm}^2$), maka kekuatan tarik beton dihitung sebagai berikut:

Tegangan akibat prategang (menekan).

$$F_p = \frac{120 \text{ N/mm}^2 \cdot 490 \text{ mm}^2}{(100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}) - 490 \text{ mm}^2} = 6.183 \text{ MPa}$$

Tegangan tarik yang dapat diberikan pada beton sebelum putus:

$$F_r + F_p = 4 + 6.183 = 10.183 \text{ MPa.}$$

Kekuatan aksial yang dapat dipikul oleh penampang transformasi beton dan prategang adalah:

$$P = 10.183 \text{ N/mm}^2 \times (100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} + (6-1) \times 490 \text{ mm}^2) = 126778.4 \text{ N.}$$

Kekuatan meningkat $126778.4/40000=3.17$ (peningkatan 317 %)

Catatan:

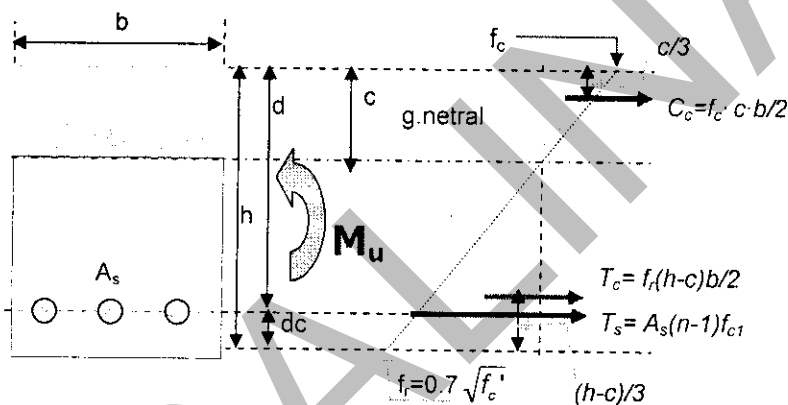
Besarnya tegangan prategang, F_p yang dapat diberikan tergantung dari mutu beton dan umur beton sehingga beton tidak hancur bila ditekan oleh gaya prategang. Semakin besar mutu beton, maka gaya pratekan yang diberikan bisa lebih besar dengan demikian semakin besar pula kekuatan aksial tariknya.

B. Perbandingan dengan kekuatan lentur.

Dalam analisis lentur menggunakan cara tegangan, balok beton tanpa tulangan akan mengalami retak tarik pada saat tegangan tarik beton melebihi izinnnya dan akhirnya hancur. Adapun pada balok beton bertulang saat beton mengalami retak tarik, bagian tarik beton ini diabaikan dan diambil-alih oleh tulangan baja. Sedangkan pada beton pratekan bila balok tidak diizinkan mengalami tarik atau diizinkan tarik namun tidak mengalami retak, maka keseluruhan tinggi penampang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas lenturnya.

Perbandingan kekuatan momen retak pada beton bertulang dan pratekan dapat diuraikan dengan contoh sebagai berikut:

1) Perhitungan momen retak beton bertulang dengan cara elastis



dimana:

$$f_c = f_r \cdot c / (h - c)$$

$$f_{c1} = f_c \cdot (d - c) / c$$

Misalkan ada penampang balok berbentuk persegi panjang dengan lebar penampang adalah sebesar 400 mm dengan ketinggian sebesar 800 mm. Material beton yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan karakteristik sebesar 35 MPa, sementara baja tulangan yang digunakan memiliki nilai tegangan leleh sebesar 400 MPa. Tegangan ultimate untuk baja prategang menggunakan $f_{pu} = 1860$ MPa. Luas tulangan ditentukan sebesar 6 kali diameter 25 mm.

Material :

Beton : $f_c' := 35 \text{ MPa}$

$$E_c := 4700 \sqrt{f_c'} \text{ MPa} \quad (\text{sub bab 10.5 SNI 03-2847-2002})$$

$$E_c = 27805.575 \text{ MPa}$$

Baja : $f_y := 400 \text{ MPa}$

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Data Penampang Balok

$$b := 400 \text{ mm} \quad d_c := 80 \text{ mm}$$

$$h := 800 \text{ mm} \quad d := h - d_c \quad d = 720 \text{ mm}$$

$$\text{Luas tulangan} \quad A_s := 6 \cdot 0.25 \pi \cdot (25 \text{ mm})^2$$

$$A_s = 2945.243 \text{ mm}^2$$

Tegangan retak, f_r

$$f_r := 0.7 \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)} \quad f_r = 4.141 \text{ MPa}$$

$$n := \frac{E_s}{E_c} \quad n = 7.193$$

cara trial n error (mencoba-coba nilai c, sampai C_c mendekati $T_s + T_c$)

$$c := 417.5 \text{ mm}$$

$$f_c := f_r \cdot \frac{c}{(h - c)} \quad f_c = 4.52 \text{ MPa}$$

$$f_{cl} := f_c \cdot \frac{(d - c)}{c} \quad f_{cl} = 3.275 \text{ MPa}$$

$$C_c := 0.5 f_c \cdot c \cdot b \quad T_c := 0.5 f_r \cdot (h - c) \cdot b \quad T_c = 316.806 \text{ kN}$$

$$T_s := A_s \cdot (n - 1) \cdot f_{cl} \quad T_s = 59.736 \text{ kN}$$

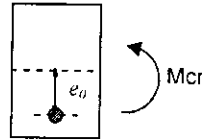
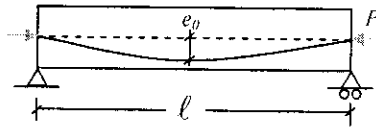
Keseimbangan gaya, $\Sigma H = 0$

$$C_c = 377.436 \text{ kN} \quad T_c + T_s = 376.542 \text{ kN}$$

Hitung M_{cr} terhadap T_s (akurat)

$$M_{crI} := C_c \cdot \left(d - \frac{c}{3} \right) - T_c \cdot \left[\frac{(h - c)}{3} - d_c \right] \quad M_{crI} = 204.179 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2) Perhitungan momen retak beton prategang



$$f_{pu} := 1860 \text{ MPa}$$

$$f_{pe} := 0.57 f_{pu} \quad f_{pe} = 1060.2 \text{ MPa}$$

$$A_c := b \cdot h \quad A_c = 320000 \text{ mm}^2$$

$$A_{ps} := A_s \quad A_{ps} = 2945.243 \text{ mm}^2$$

$$P := A_{ps} \cdot f_{pe} \quad P = 3.123 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$e_0 := 200 \text{ mm}$$

$$\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e_0}{Z_b} - \frac{M_{cr}}{Z_b} = -f_r$$

$$M_{cr2} := \left(\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e_0}{Z_b} + f_r \right) \cdot Z_b \quad M_{cr2} = 1.218 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Perbandingan momen retak $\frac{M_{cr2}}{M_{cr1}} = 5.963$ (peningkatan hampir 600%)

Konvensi:

tegangan

(+) tegangan tekan

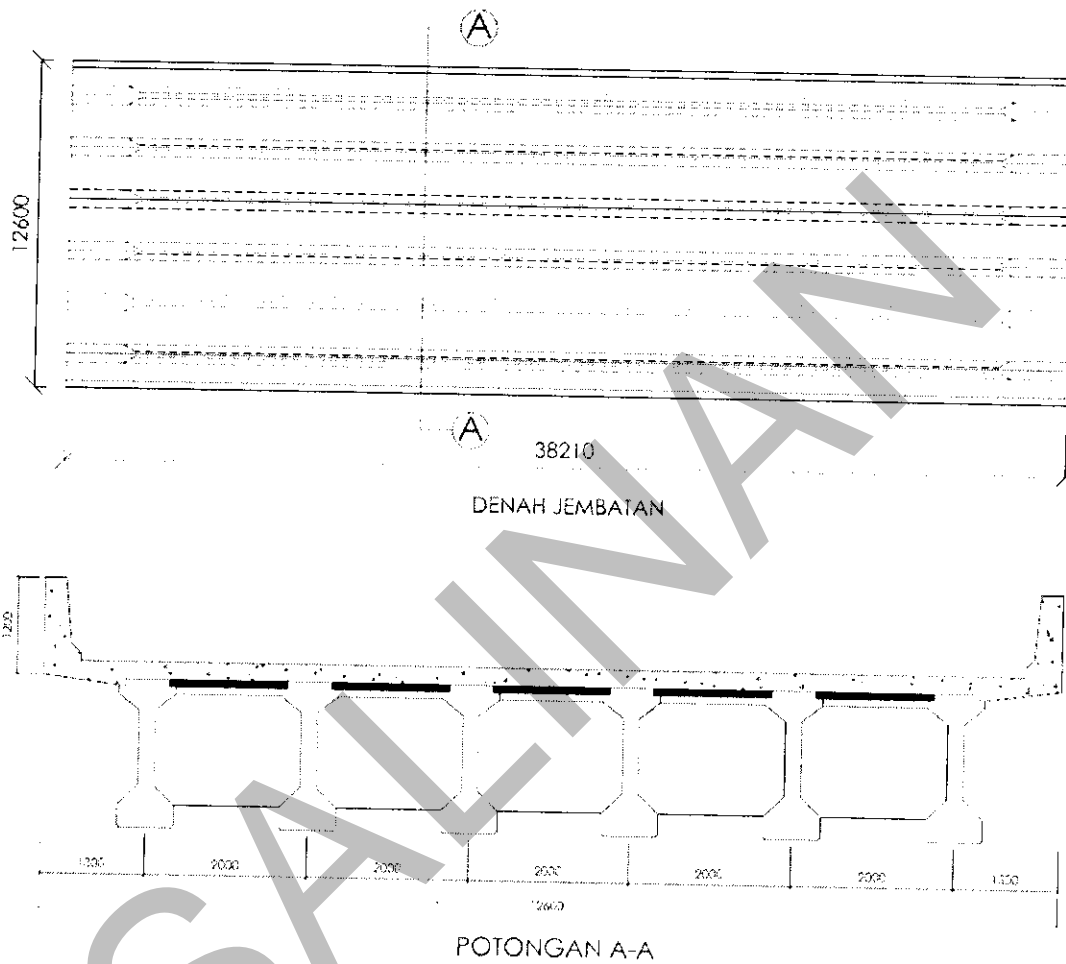
(-) tegangan tarik

momen

(+) menekan serat atas

(-) menekan serat bawah

Berbagai jenis balok girder pratekan yang sudah diaplikasikan pada jembatan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

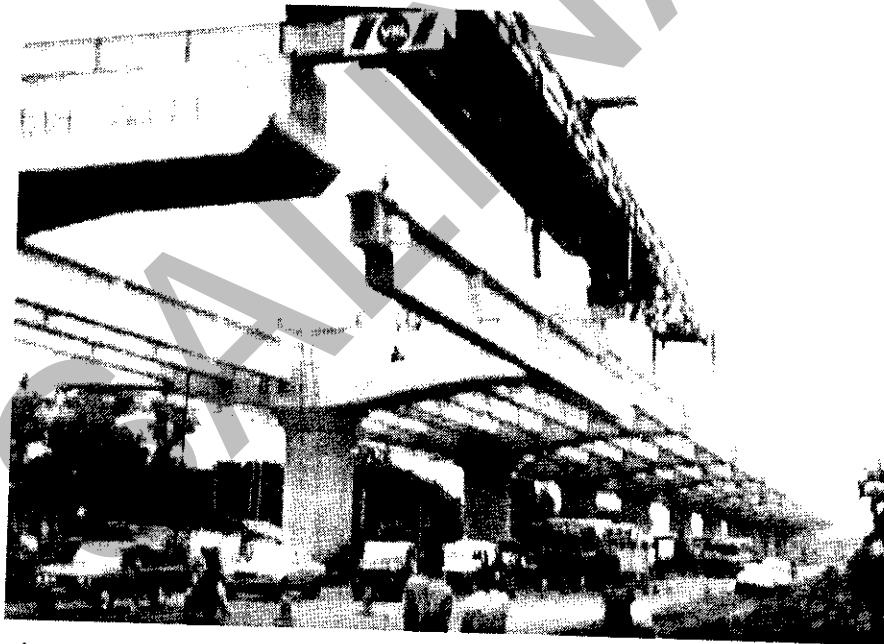


Gambar 1-2 Jembatan Cikubang Cipularang

1.5 Keuntungan Beton Pratekan

Struktur beton pratekan mempunyai beberapa keuntungan sebagai berikut:

1. Terhindar dari retak terbuka di daerah tarik, sehingga dengan demikian beton pratekan lebih tahan terhadap penetrasi klorida.
2. Lebih kedap air, sehingga air pada pelat jembatan tidak mudah meresap.
3. Dapat diperoleh defleksi struktur yang lebih kecil, dengan terbentuknya lawan lendut (chamber) dari konfigurasi layout kabel prategang sepanjang elemen.
4. Penampang struktur lebih kecil/langsing, karena seluruh luas penampang dapat digunakan secara efektif.
5. Memungkinkan bentang yang lebih panjang dibandingkan beton bertulang.
6. Karena kabel prategang menggunakan mutu baja tinggi, sehingga kapasitas penampangnya jauh lebih besar daripada tulangan biasa dengan luas tulangan yang sama.



Gambar 1-3 Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Girder *Post-Tension*

1.6 Material Beton Prategang

1.6.1 Beton

Beton yang digunakan untuk membuat elemen struktur beton prategang harus mempunyai kuat tekan yang tinggi. Kekuatan dan tahanan lama yang dicapai melalui kontrol kualitas dan jaminan kualitas pada tahap produksi adalah dua faktor penting dalam mendesain struktur beton prategang.

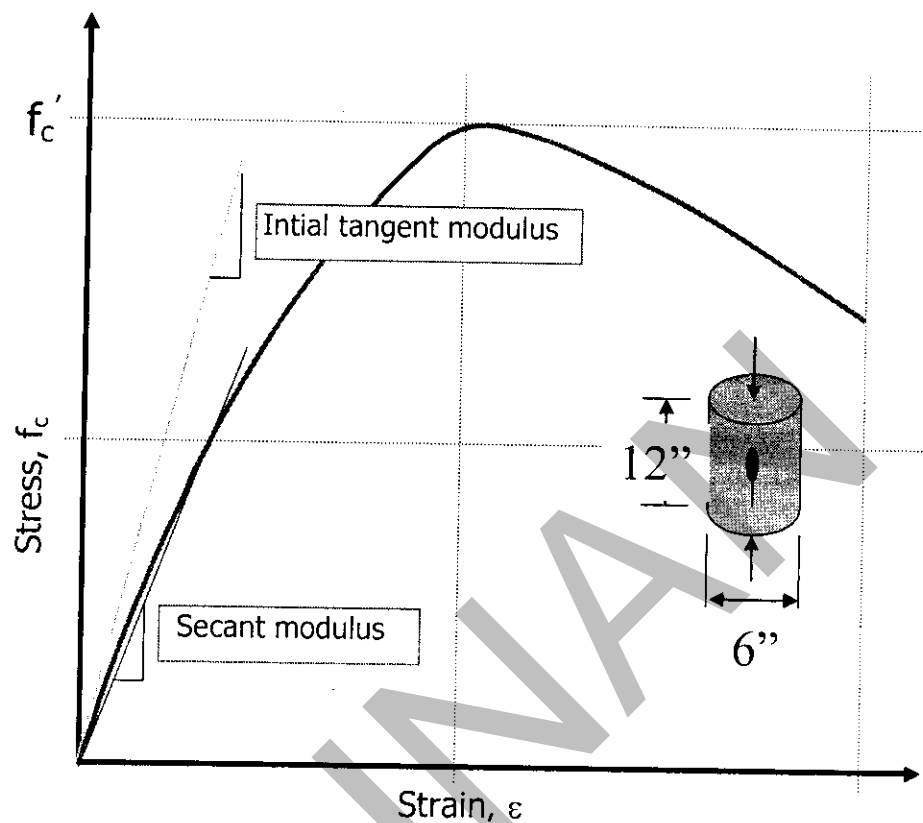
A. Mutu tinggi

Mutu beton yang biasa digunakan dalam perhitungan beton bertulang adalah mutu beton normal sampai mutu tinggi. Beton mutu tinggi sebagaimana disebutkan dalam RSNi T-12-2004 adalah beton yang mempunyai kuat tekan silinder, f_c' melebihi 60 MPa, sedangkan beton normal adalah beton dengan berat isi $\pm 2400 \text{ kg/m}^3$, f_c' antara 20 MPa s.d 60 MPa. Adapun kekuatan beton untuk struktur prategang SNI mensyaratkan tidak boleh kurang dari 30 MPa (RSNi T-12-2004, 4.4.1.1.1).

B. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas beton, E_c , Nilainya tergantung pada mutu beton, besarnya modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh material dan proporsi campuran beton. Nilai E_c untuk beton normal sebagai berikut:

- $E_c = w_c^{1.5} (0,043 \sqrt{f_c'})$, dinyatakan dalam MPa; atau
- $E_c = 4700 \sqrt{f_c'}$ (SNI 03-2847-2002), dinyatakan dalam MPa; atau
- ditentukan dari hasil pengujian.



Gambar 1-4 Kurva Stress-Strain Beton

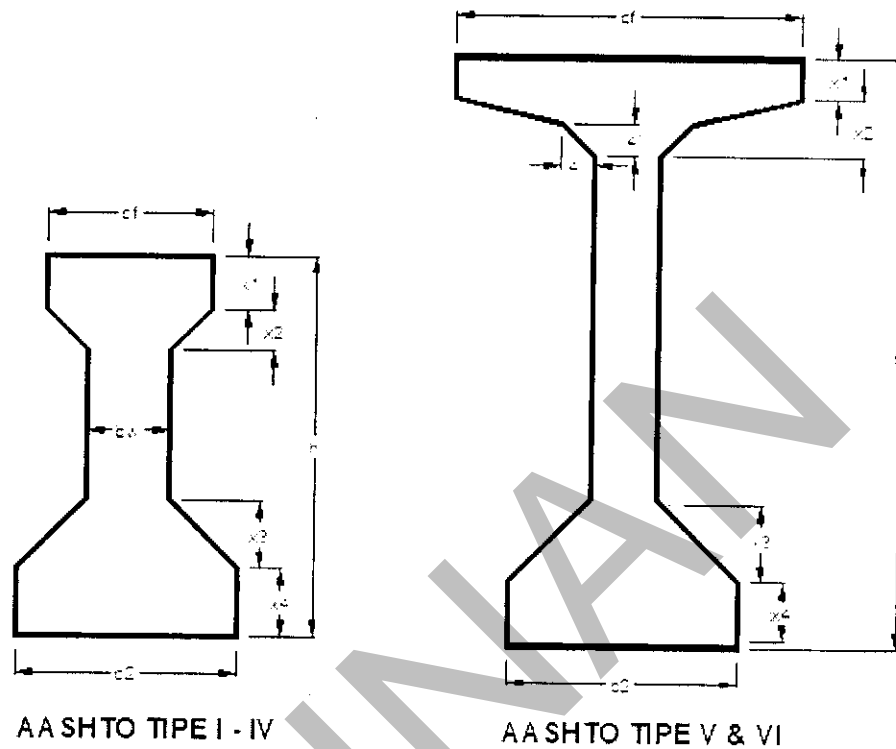
C. Jenis Penampang Girder Prategang

Terdapat beberapa jenis penampang beton yang biasa digunakan untuk jembatan. Pemilihan jenis penampang tergantung dari kebutuhan panjang bentang, kerumitan alinyemen dan metoda pelaksanaan. Adapun jenis penampang dapat diuraikan sebagai berikut :

- *Penampang I-girder dan T-bulb AASHTO*

Penampang I-girder dan T-bulb AASHTO dapat digunakan untuk bentang jembatan antara 9.1 m sampai dengan 42 m.

Ada 2 jenis penampang AASHTO yang umum digunakan dalam perencanaan jembatan sebagai berikut :



Gambar 1-5 Penampang Girder Beton AASHTO (I dan T-bulb)

Tabel 1-1 Detail Geometris Penampang AASHTO

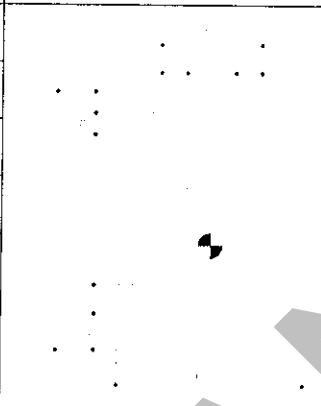
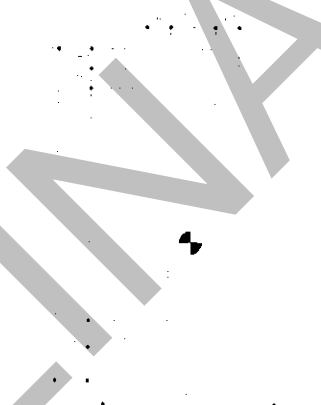
Penampang	b_f in / (mm)	x_1 in / (mm)	x_2 in / (mm)	b_2 in / (mm)	x_3 in / (mm)	x_4 in / (mm)	b_w in / (mm)	h in / (mm)
AASHTO 1	12 (304.80)	4 (101.60)	3 (76.20)	16 (406.40)	5 (127.00)	5 (127.00)	6 (152.40)	28 (711.20)
AASHTO 2	12 (304.80)	6 (152.40)	3 (76.20)	18 (457.20)	6 (152.40)	6 (152.40)	6 (152.40)	36 (914.40)
AASHTO 3	16 (406.40)	7 (177.80)	4.5 (114.30)	22 (558.80)	7.5 (190.50)	7 (177.80)	7 (177.80)	45 (1143.00)
AASHTO 4	20 (508.00)	8 (203.20)	6 (152.40)	26 (660.40)	9 (228.60)	8 (203.20)	8 (203.20)	54 (1371.60)
AASHTO 5	42 (1066.80)	5 (127.00)	7 (177.80)	28 (711.20)	10 (254.00)	8 (203.20)	8 (203.20)	63 (1600.20)
AASHTO 6	42 (1066.80)	5 (127.00)	7 (177.80)	28 (711.20)	10 (254.00)	8 (203.20)	8 (203.20)	72 (1828.80)

Tabel 1-2 Modulus Penampang AASHTO

Penampang	Span ft / (m)	A in ² / (cm ²)	I in ⁴ / (cm ⁴)	Yb in / (cm)	Sb in ³ / (cm ³)	St in ³ / (cm ³)
AASHTO 1	30 - 45 (9.1) - (13.7)	276.00 (1780.64)	22,744.13 (946,682.12)	12.59 (31.98)	1,806.61 (29,605.09)	1,475.87 (24,185.22)
AASHTO 2	40 - 60 (12.2) - (18.3)	369.00 (2380.64)	50,978.74 (2,121,895.52)	15.83 (40.21)	3,220.54 (52,775.15)	2,527.36 (41,416.05)
AASHTO 3	55 - 80 (16.8) - (24.4)	559.50 (3609.67)	125,390.35 (5,219,140.35)	20.27 (51.49)	6,184.95 (101,353.19)	5,071.08 (83,100.16)
AASHTO 4	70 - 100 (21.3) - (30.5)	789.00 (5090.31)	260,740.61 (10,852,843.43)	24.73 (62.82)	10,541.86 (172,750.08)	8,909.29 (145,997.05)
AASHTO 5	90 - 120 (27.4) - (36.6)	1,013.00 (6535.47)	521,162.59 (21,692,424.73)	31.96 (81.17)	16,308.47 (267,247.90)	16,788.17 (275,108.88)
AASHTO 6	110 - 140 (33.5) - (42.7)	1,085.00 (6999.99)	733,320.29 (30,523,095.12)	36.38 (92.41)	20,156.88 (330,312.08)	20,587.69 (337,371.82)

Beberapa penampang tipikal I dan U girder yang telah banyak digunakan saat ini diperlihatkan pada tabel-tabel berikut di bawah.

Tabel 1-3 Penampang Balok Gelagar Tipe I

Type	Dimensi		Gambar
H-90	Area (mm ²)	257,150.00	
	Inersia (mm ⁴)	22,653,110,735.88	
	yt (mm)	536.6	
	Zt (mm ³)	42,216,009.57	
	yb (mm)	363.4	
	Zb (mm ³)	62,336,573.30	
H-125	Area (mm ²)	316,650.00	
	Inersia (mm ⁴)	54,939,524,663.81	
	yt (mm)	730.5	
	Zt (mm ³)	75,208,110.42	
	yb (mm)	519.5	
	Zb (mm ³)	105,754,619.18	

MANUAL PERENCANAAN STRUKTUR BETON PRATEKAN UNTUK JEMBATAN

Type	Dimensi		Gambar
H-160	Area (mm ²)	477,275.00	
	Inersia (mm ⁴)	146,060,000,000.00	
	yt (mm)	888.5	
	Zt (mm ³)	164,389,420.37	
	yb (mm)	711.5	
	Zb (mm ³)	205,284,609.98	
H-170	Area (mm ²)	658,750.00	
	Inersia (mm ⁴)	235,220,000,000.00	
	yt (mm)	884.7	
	Zt (mm ³)	265,875,438.00	
	yb (mm)	815.3	
	Zb (mm ³)	288,507,297.93	
H-210	Area (mm ²)	734,750.00	
	Inersia (mm ⁴)	407,960,000,000.00	
	yt (mm)	1,093.80	
	Zt (mm ³)	372,974,949.72	
	yb (mm)	1,006.20	
	Zb (mm ³)	405,446,233.35	

Tabel 1-4 Penampang Balok Gelagar Tipe U

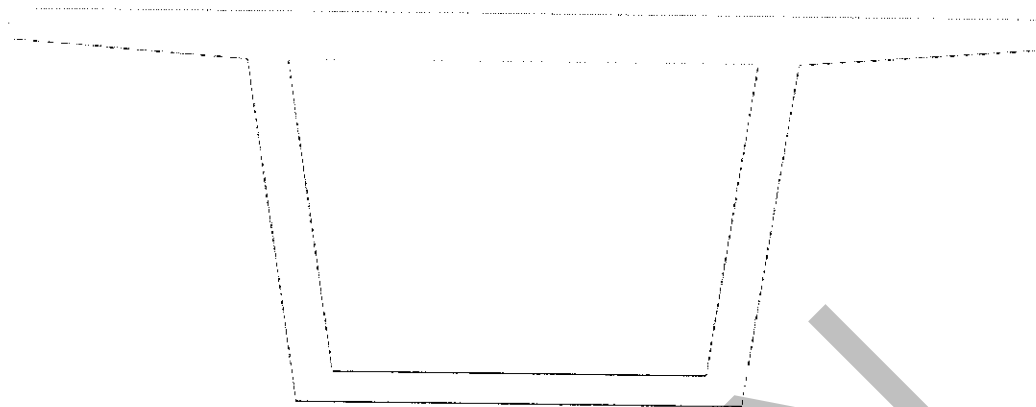
Type	Dimensi		Gambar
H-120	Area (mm ²)	926,400.00	
	Inersia (mm ⁴)	126,770,000,000.00	
	yt (mm)	637.10	
	Zt (mm ³)	198,979,752.00	
	yb (mm)	562.90	
	Zb (mm ³)	225,208,740.45	
H-140	Area (mm ²)	1,044,400.00	
	Inersia (mm ⁴)	196,960,000,000.00	
	yt (mm)	741.70	
	Zt (mm ³)	265,552,110.02	
	yb (mm)	658.30	
	Zb (mm ³)	299,194,895.94	

Type	Dimensi		Gambar
H-165	Area (mm ²)	1,200,900.00	
	Inersia (mm ⁴)	315,250,000,000.00	
	yt (mm)	869.60	
	Zt (mm ³)	362,522,999.08	
	yb (mm)	780.40	
	Zb (mm ³)	403,959,507.94	
H-185	Area (mm ²)	1,318,900.00	
	Inersia (mm ⁴)	435,420,000,000.00	
	yt (mm)	973.20	
	Zt (mm ³)	447,410,604.19	
	yb (mm)	876.80	
	Zb (mm ³)	496,601,277.37	

Penampang I-girder yang tidak disebutkan dalam tabel diatas bisa juga digunakan asalkan memenuhi persyaratan peraturan yang berlaku.

- *Penampang Box-girder*

Box-girder sangat baik menahan pengaruh momen torsi dan secara tipikal tidak memerlukan elemen *bracing*. Penampang box girder juga dapat digunakan untuk bentang yang lebih panjang. Sebagai contoh sebuah jembatan di dekat Tokyo, Jepang menggunakan box girder untuk bentang 240m.



Gambar 1-6 Penampang Box Girder

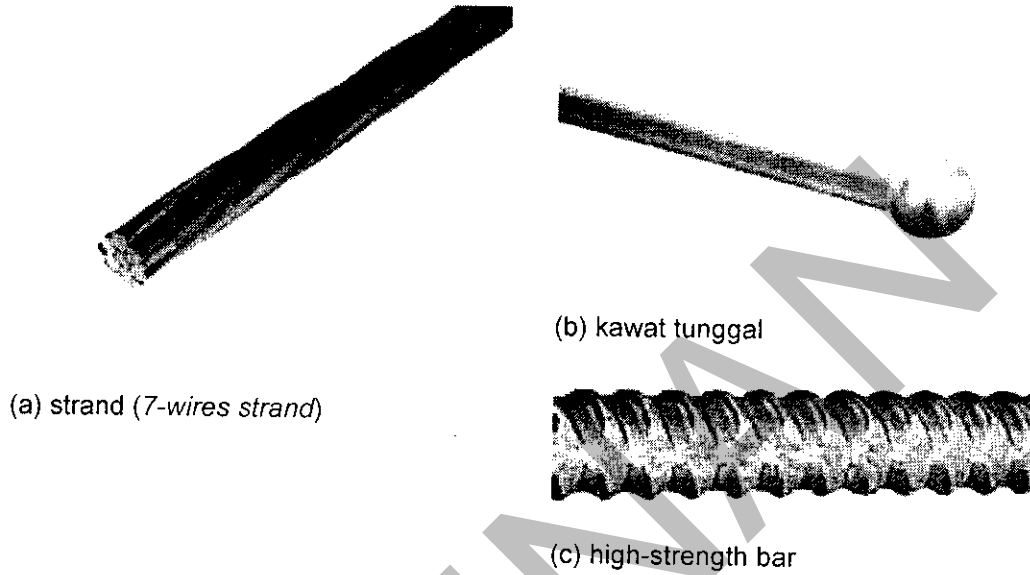
1.6.2 Tulangan Prategang

Kehilangan tegangan akibat rangkak (creep) dan susut (shrinkage) pada beton cukup besar, sehingga pemberian tegangan tekan pada beton akan lebih efektif bila menggunakan baja mutu tinggi dengan kisaran lebih dari 1862 MPa.

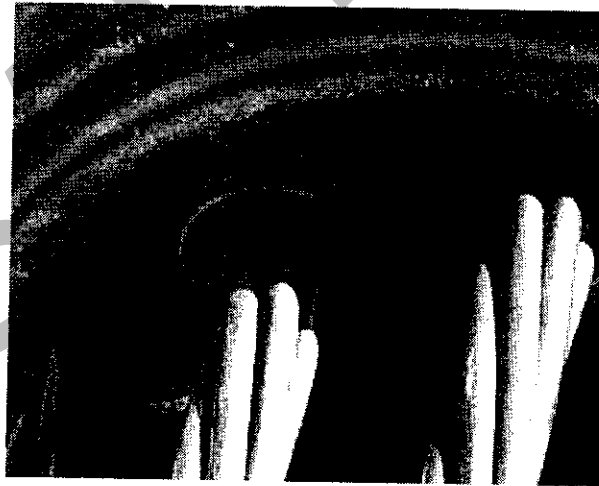
- (1) Tendon untuk tulangan prategang harus memenuhi salah satu dari spesifikasi berikut:
 - a) Kawat yang memenuhi "Spesifikasi untuk baja *stress-relieved* tanpa lapisan untuk beton prategang" (ASTM A 421).
 - b) Kawat dengan relaksasi rendah, yang memenuhi "Spesifikasi untuk kawat baja *stress-relieved* tanpa lapisan untuk beton prategang" termasuk suplemen "Kawat dengan relaksasi rendah" (ASTM A 421).
 - c) *Strand* yang sesuai dengan "Spesifikasi untuk *strand* baja, tujuh kawat tanpa lapisan untuk beton prategang" (ASTM A 416M).
 - d) Tulangan, yang sesuai "Spesifikasi untuk baja tulangan mutu tinggi tanpa lapisan untuk beton prategang" (ASTM A 722).
- (2) Kawat, strand, dan batang tulangan yang tidak secara khusus tercakup dalam ASTM A 421, ASTM A 416M, atau ASTM A 722, diperkenankan untuk digunakan bila tulangan tersebut memenuhi persyaratan minimum dari spesifikasi tersebut di atas dan tidak mempunyai sifat yang membuatnya kurang baik dibandingkan dengan sifat-sifat seperti yang terdapat pada ASTM A 421, ASTM A 416, atau ASTM A 722.

A. Jenis tulangan prategang

Jenis tulangan prategang dapat berupa kawat tunggal, gabungan kabel yang dipilin membentuk strand, dan tulangan mutu tinggi (high-strength bar).



Gambar 1-7 Jenis tulangan prategang



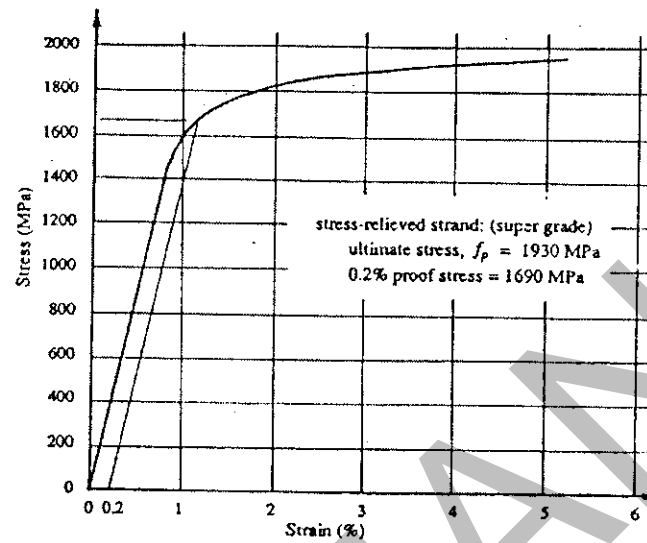
Gambar 1-8 Strand, Baji dan Kepala Angkur

B. Kuat tarik

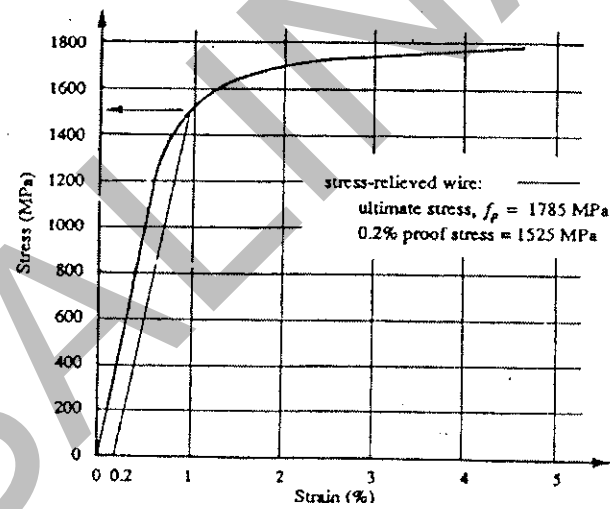
Kuat tarik baja prategang, f_{pu} harus ditentukan dari hasil pengujian, atau diambil sebesar mutu baja yang disebutkan oleh fabrikator berdasarkan sertifikat fabrikasi yang resmi.

Tabel 1-5 Jenis Tulangan Prategang

Jenis material	Nominal diameter	Luas	Gaya Putus minimum	Tegangan tarik minimum, f_{pu}
	mm	mm ²	kN	MPa
Kawat (wire)	5	19.6	30.4	1550
	5	19.6	33.3	1700
	7	38.5	65.5	1700
7-wire strand super grade	9.3	54.7	102	1860
	12.7	100	184	1840
	15.2	143	250	1750
7-wire strand Regular grade	12.7	94.3	165	1750
Bar	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080



(a) Kurva tegangan-regangan 7-wire strand



(b) Kurva tegangan-regangan stress-relieved wire

Gambar 1-9 Kurva tegangan-regangan tipikal,
7-wire strand dan stress-relieved wire

C. Kuat tarik leleh ekivalen

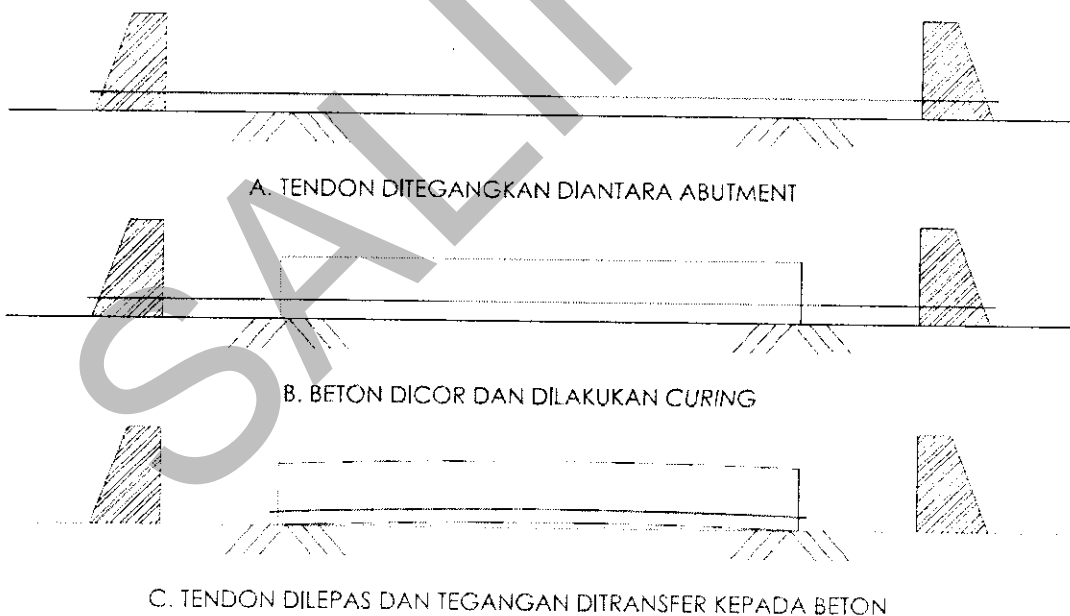
Kuat leleh baja prategang, f_{py} harus ditentukan dari hasil pengujian atau dianggap sebagai berikut:

- Untuk kawat baja prategang : $f_{py} = 0,75 f_{pu}$
- Untuk semua kelas strand dan tendon baja bulat : $f_{py} = 0,85 f_{pu}$

1.7 Sistem Penegangan

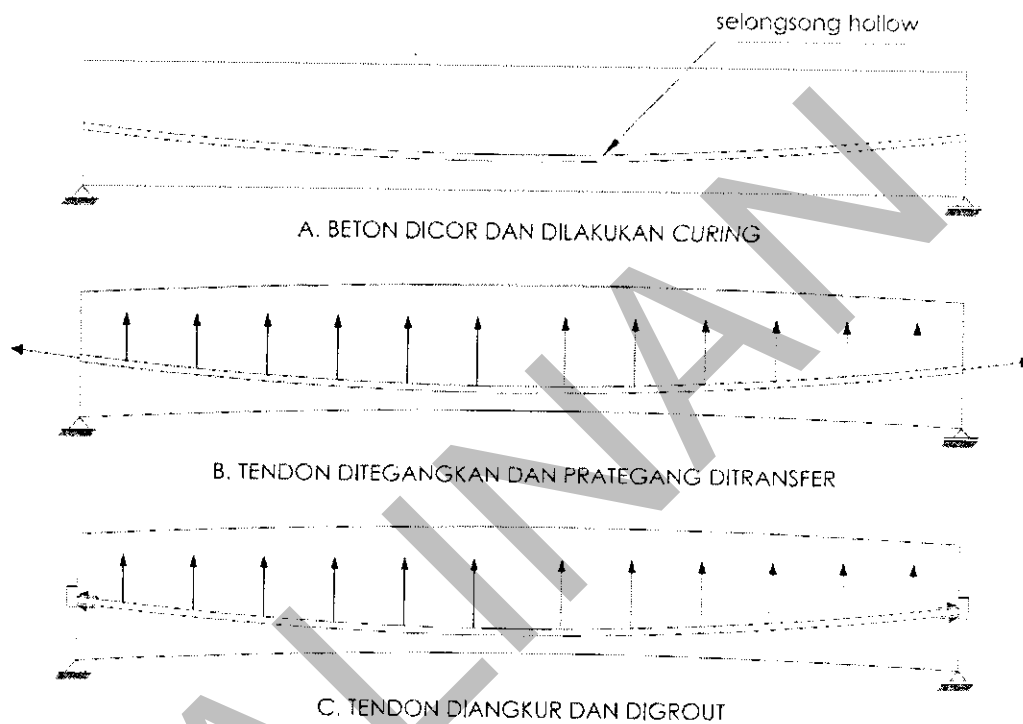
Ditinjau dari segi sistem penegangan terdapat dua cara penegangan pada elemen struktur prategang, yaitu :

1. Pra-tarik (*Pretensioning*), adalah suatu sistem pemberian tegangan tekan pada elemen beton dengan menegangkan kabel prategang terlebih dahulu (biasanya menggunakan *hydraulic-jack*) melalui struktur abutment untuk menahan kabel tersebut, setelah beton dicor dan cukup keras tegangan ditransfer perlahan-lahan.



Gambar 1-10 Prosedur Pra-tarik (*pre-tension*)

2. Pasca-tarik (*post-tensioning*), adalah suatu sistem pemberian tegangan tekan pada elemen beton dengan cara kabel baja ditegangkan pada saat beton telah cukup keras kemudian tegangan ditransfer pada elemen beton tersebut melalui sistem angkur.



Gambar 1-11 Prosedur Pasca-tarik (*post-tension*)

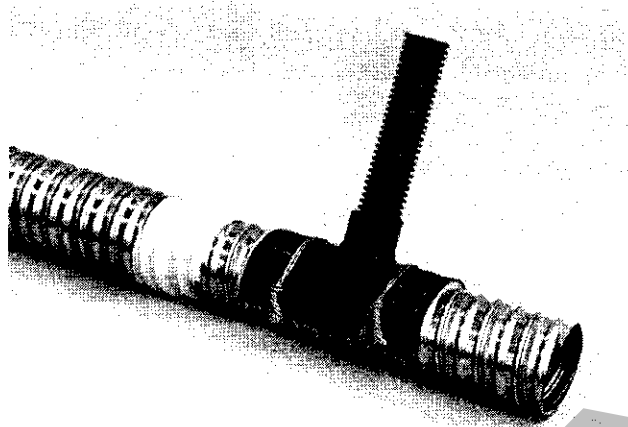
Berdasarkan pada ikatan tendon dengan betonnya, pasca-tarik terbagi menjadi dua bagian :

Bonded

Setelah gaya prategang diaplikasikan pada beton, ruang kosong antara lubang dan tendon diisi dengan material *grout*.

Unbonded

Setelah gaya prategang diaplikasikan pada beton, ruang kosong antara lubang dan tendon dibiarkan begitu saja. Adapun perlindungan tendon dari korosi biasanya dilakukan dengan sistem pelapisan yang tahan air (*waterproof*).



Gambar 1-12 Corrugated metal duct untuk aplikasi internal grout



Gambar 1-13 Pelaksanaan Grouting Tendon

2 PERENCANAAN BERDASARKAN BATAS LAYAN (PBL)

2.1 Umum

Dalam perencanaan berdasarkan batas layan struktur dianggap berperilaku elastis linier. Kekuatan rencana yang diizinkan R_w harus ditentukan berdasarkan persyaratan yang sesuai untuk struktur yang ditinjau (untuk komponen balok, komponen tekan, dan sebagainya).

Keamanan suatu komponen struktur SF ditentukan sedemikian rupa sehingga kuat rencana yang diizinkan R_w tidak lebih kecil dari pengaruh aksi rencana S_w :

$$S_w \leq R_w = \frac{\text{Kapasitas}_{\text{ultimate}}}{SF}$$

Dengan demikian perencanaan secara PBL dilakukan untuk mengantisipasi suatu kondisi batas layan, yang terdiri antara lain dari:

- Tegangan kerja.
- Deformasi permanen.
- Vibrasi.
- Korosi, retak dan fatik.
- Bahaya banjir di sekitar jembatan.

Kombinasi pembebanan yang dipilih baik kondisi batas maupun layan seharusnya mengikuti kombinasi pembebanan BMS atau SIN Pembebanan untuk jembatan.

2.2 Tegangan Izin

2.2.1 Tegangan izin tekan pada kondisi layan

Tegangan tekan izin, $\overline{\sigma_{cs}} = 0,45 f_c'$ (untuk semua kombinasi beban).

2.2.2 Tegangan izin tekan pada kondisi beban sementara atau kondisi transfer gaya prategang.

Tegangan tekan izin penampang beton, $\overline{\sigma_{ci}} = 0,60 f_{ci}'$

Dimana:

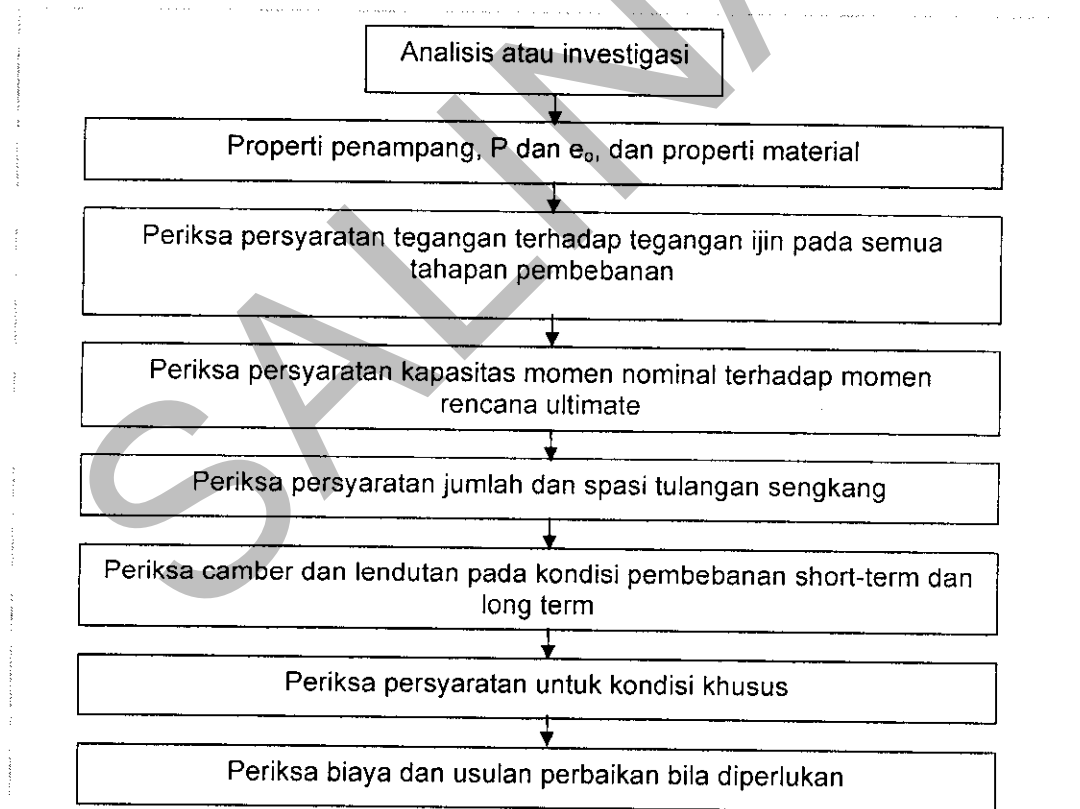
f_{ci} ' adalah kuat tekan beton initial pada saat transfer gaya prategang.

2.2.3 Tegangan izin tarik pada kondisi batas layan, $\overline{\sigma}_{ts}$

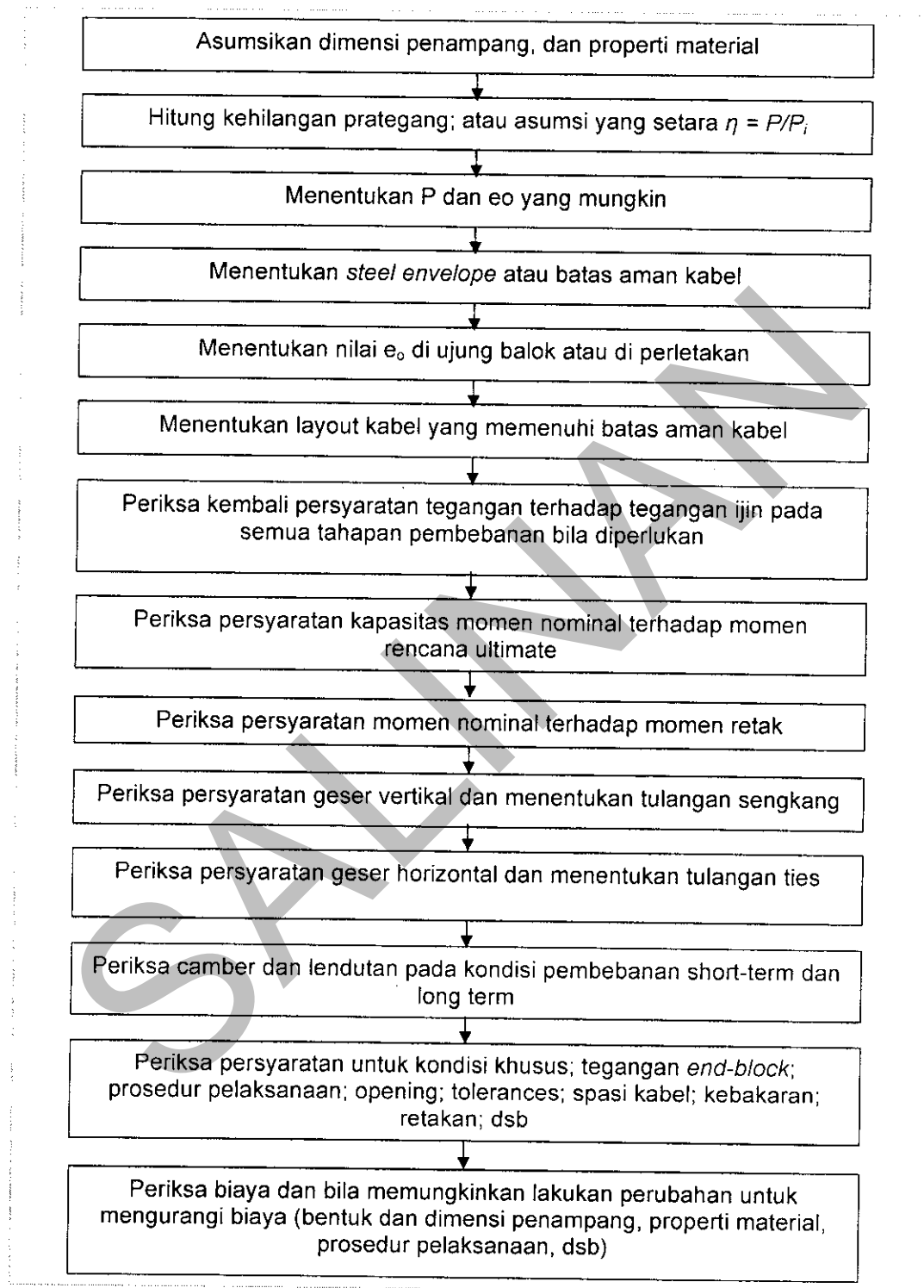
- Beton tanpa tulangan : $\overline{\sigma}_{ts} = 0,15 \sqrt{f_c}'$
- Beton prategang penuh : $\overline{\sigma}_{ts} = 0,5 \sqrt{f_c}'$

2.2.4 Tegangan izin tarik pada kondisi transfer gaya prategang, $\overline{\sigma}_{ti}$

- $0,25 \sqrt{f_{ci}}'$ (selain di perletakan).
- $0,5 \sqrt{f_{ci}}'$ (di perletakan)



Gambar 2-1 Langkah-langkah analisis atau investigasi lentur dalam PBL



Gambar 2-2 Langkah-langkah desain lentur dalam PBL

2.3 Perjanjian Tanda


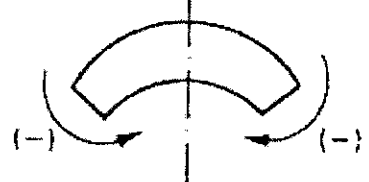
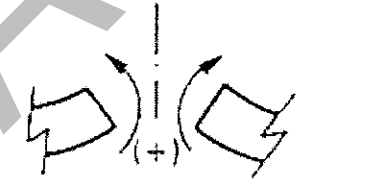
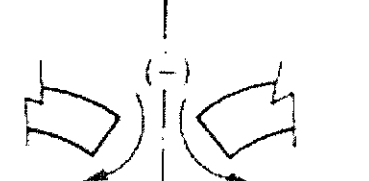
Sekalipun dalam beton prategang efek tekan dan tarik pada kasus sederhana dapat dimengerti, namun penting untuk membuat perjanjian tanda untuk menghindari kesalahan dalam analisis yang kompleks dan sistematis. Hal ini juga penting khususnya bila kita menganalisis dengan bantuan komputer. Perjanjian tanda dalam manual ini secara umum sebagai berikut:

Tegangan

Tanda (+) untuk tegangan tarik

Tanda (-) untuk tegangan tekan

Momen

Tanda		
	Positif	Negatif
Momen Eksternal		
Momen Internal		

Koordinat lokal penampang (untuk k_t , k_b , e)

Tanda (+) untuk jarak dari pusat penampang (c.g.c) ke arah serat bawah

Tanda (-) untuk jarak dari pusat penampang (c.g.c) ke arah serat atas

Persamaan tegangan pada serat atas dan bawah penampang berkaitan dengan momen lentur dan gaya prategang untuk balok di atas perletakan sederhana dapat dituliskan variatif dalam Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Variasi persamaan tegangan yang disebabkan oleh momen dan gaya prategang

Pengaruh dari	Serat atas/bawah	Persamaan tegangan
Momen Positif, M	atas	$\sigma_a = -\frac{M \cdot y_t}{I} = -\frac{M}{S_t} = -\frac{M \cdot y_t}{A_c \cdot r^2} = -\frac{M}{A_c \cdot k_b}$
	bawah	$\sigma_b = \frac{M \cdot y_b}{I} = \frac{M}{S_b} = \frac{M \cdot y_b}{A_c \cdot r^2} = \frac{M}{A_c \cdot k_t}$
Gaya prategang, P dengan eksentrisitas e_o ke arah serat bawah.	atas	$\sigma_a = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e_o \cdot y_t}{I} = -\frac{P}{A_c} \left(1 - \frac{e_o \cdot y_t}{r^2} \right)$ $= -\frac{P}{A_c} \left(1 - \frac{e_o}{k_b} \right) = -\frac{P}{A_c} \left(1 - \frac{e_o \cdot A_c}{S_t} \right)$ $= -\frac{P}{S_t} (k_b - e_o)$
	bawah	$\sigma_b = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e_o \cdot y_t}{I} = -\frac{P}{A_c} \left(1 + \frac{e_o \cdot y_t}{r^2} \right)$ $= -\frac{P}{A_c} \left(1 + \frac{e_o}{k_t} \right) = -\frac{P}{A_c} \left(1 + \frac{e_o \cdot A_c}{S_b} \right)$ $= -\frac{P}{S_b} (e_o + k_t)$

Dimana notasi-notasi di atas sebagai berikut:

- I = momen inersia penampang
- y_t = jarak dari pusat penampang (c.g.c) ke serat atas terluar
- y_b = jarak dari pusat penampang (c.g.c) ke serat bawah terluar
- σ = tegangan dalam beton secara umum
- S_t = I/y_t = modulus penampang pada serat atas
- S_b = I/y_t = modulus penampang pada serat bawah

- $r = \sqrt{I/A_c}$ = modulus penampang pada serat bawah
 $k_t = -I/(A_c y_b) = -S_b/A_c = -r^2/y_b$ = jarak dari cgc ke batas atas *kern*.
 $k_b = I/(A_c y_t) = S_t/A_c = r^2/y_t$ = jarak dari cgc ke batas bawah *kern*.

2.4 Rumus Umum Perhitungan Tegangan

Kondisi awal:

$$\sigma_s = -\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e_o \cdot y_t}{I} - \frac{M_{\min} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{ti}}$$

$$\sigma_b = -\frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e_o \cdot y_b}{I} + \frac{M_{\min} \cdot y_t}{I} \geq \overline{\sigma_{ci}}$$

Kondisi layan:

$$\sigma_s = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e_o \cdot y_t}{I} - \frac{M_{\max} \cdot y_t}{I} \geq \overline{\sigma_{cs}}$$

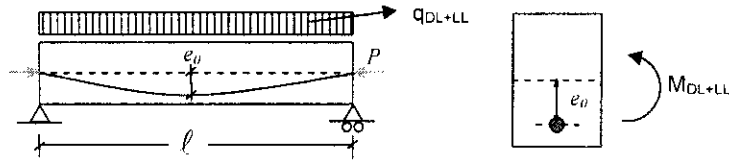
$$\sigma_b = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e_o \cdot y_b}{I} + \frac{M_{\max} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{ls}}$$

Keterangan :

M_{\min} = momen maksimum yang bekerja pada kondisi awal, biasanya momen akibat berat sendiri balok pada saat transfer

M_{\max} = momen total maksimum yang bekerja pada kondisi akhir atau layan

Contoh 2.1: Berikut ini adalah Balok di atas perletakan sederhana. Contoh ini hanya sebagai ilustrasi perhitungan saja untuk penyederhanaan. Dalam prakteknya bentuk penampang dan beban lebih rumit namun prinsipnya sama.



Diketahui :

$P := 525 \text{ kN}$ (gaya prategang setelah semua losses)

$L := 12 \text{ m}$ $e_0 := 200 \text{ mm}$

$b := 300 \text{ mm}$ $h := 600 \text{ mm}$

Mutu beton $f_c := 50 \text{ MPa}$

1. Hitung tegangan ijin

Tegangan ijin layan

$$\sigma_{ts} := 0.5 \cdot \sqrt{f_c \cdot \text{MPa}} \quad \sigma_{ts} = 3.536 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

$$\sigma_{cs} := -0.45 \cdot f_c \quad \sigma_{cs} = -22.5 \text{ MPa} \quad (\text{tekan})$$

Tegangan ijin initial

$$\sigma_{ti} := 0.25 \cdot \sqrt{f_c \cdot \text{MPa}} \quad \sigma_{ti} = 1.768 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

$$\sigma_{ci} := -0.6 \cdot f_c \quad \sigma_{ci} = -30 \text{ MPa} \quad (\text{tekan})$$

2. Hitung Momen lentur

Beban mati sendiri

$$q_{DL} := b \cdot h \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad q_{DL} = 4.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{DL} := \frac{1}{8} \cdot q_{DL} \cdot L^2 \quad M_{DL} = 81 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Beban hidup

$$q_L := 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_L := \frac{1}{8} \cdot q_L \cdot L^2 \quad M_L = 72 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momen total

$$M_{max} := M_{DL} + M_L \quad M_{max} = 153 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3. Hitung Properti Penampang

$$I := \frac{b \cdot h^3}{12} \quad I = 5.4 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$A_c := b \cdot h \quad A_c = 1.8 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$y_t := \frac{h}{2} \quad y_t = 300 \text{ mm}$$

$$y_b := \frac{h}{2} \quad y_b = 300 \text{ mm}$$

$$S_t := \frac{I}{y_t} \quad S_t = 1.8 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$S_b := \frac{I}{y_b} \quad S_b = 1.8 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$k_t := -\frac{S_b}{A_c} \quad k_t = -100 \text{ mm}$$

$$k_b := \frac{S_t}{A_c} \quad k_b = 100 \text{ mm}$$

4. Periksa tegangan pada serat atas dan bawah kondisi transfer

di midspan $e := e_o \quad e = 200 \text{ mm}$

asumsi : $\eta := 0.83 \quad P_i := \frac{P}{\eta}$

$$\sigma_a := \frac{-P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e}{S_t} - \frac{M_{DL}}{S_t} \quad \sigma_a = -0.986 \text{ MPa} \leq \sigma_{ti} = 1.768 \text{ MPa}$$

(tarik)

$$\sigma_b := \frac{-P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e}{S_b} + \frac{M_{DL}}{S_b} \quad \sigma_b = -6.042 \text{ MPa} \geq \sigma_{ci} = -30 \text{ MPa}$$

(tekan)

5. Periksa tegangan pada serat atas dan bawah kondisi layan

di midspan $e := e_0$ $e = 200\text{mm}$

$$\sigma_a := \frac{-P}{A_c} + \frac{P \cdot e}{S_t} - \frac{M_{max}}{S_t} \quad \sigma_a = -5.583\text{MPa} \geq \sigma_{cs} = -22.5\text{MPa}$$

(tekan)

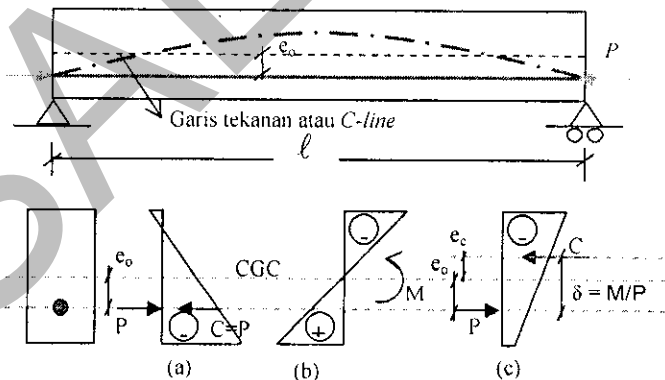
$$\sigma_b := \frac{-P}{A_c} - \frac{P \cdot e}{S_b} + \frac{M_{max}}{S_b} \quad \sigma_b = -0.25\text{MPa} \leq \sigma_{ts} = 3.536\text{MPa}$$

(tarik)

2.5 Profil Kabel

2.5.1 Garis tekanan atau C-line

Sebelum momen luar bekerja, gaya tekan penampang beton C besarnya sama dengan gaya prestressnya P dan garis kerjanya sama dengan P (gambar 3-3(a)). Bila momen luar sudah bekerja diagram tegangan menjadi seperti ditunjukkan gambar 3-3(b). Hasil superposisi diagram tegangan akibat prategang dan diagram tegangan akibat momen luar menjadi seperti ditunjukkan gambar 3-3(c).



Gambar 2-3 Garis tekanan atau C-line

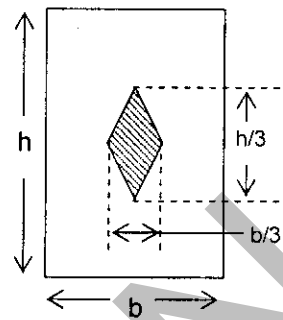
Dari gambar 3-3(c) dapat ditunjukkan juga bahwa posisi gaya C terhadap garis berat penampang (CGC) adalah e_c yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$e_c = e_0 - \frac{M}{P}$$

Untuk statis tertentu, nilai $e_c = e_o$ bila tak ada beban luar yang bekerja. Namun tidak demikian pada statis tak tentu. Pembahasan statis tak tentu dapat dilihat pada Bab 5.

2.5.2 Central kern versus limit kern

Central kern adalah daerah sepanjang balok prategang dimana gaya aksial tekan tidak akan menyebabkan tegangan tarik di serat atas maupun bawah. Hal ini dapat terjadi bila garis kerja C berada pada k_t dan k_b .



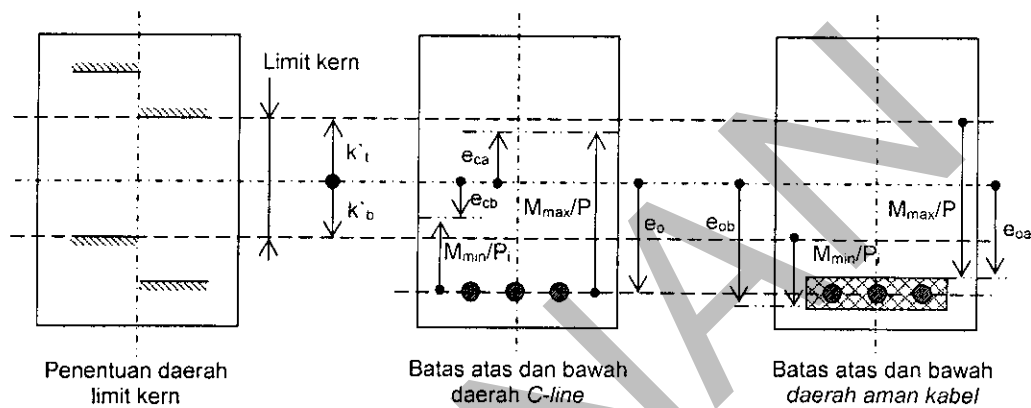
Gambar 2-4 Central kern

Sedangkan *limit kern* adalah daerah sepanjang balok dimana gaya aksial tekan tidak akan menyebabkan tegangan yang melebihi tegangan izinnya (baik tarik maupun tekan).

Limit kern diperoleh dari pertidaksamaan tegangan pada sub bab 3.3. Bila ruas kiri dan kanannya persamaan tegangan pada sub bab 3.3 dikalikan dengan A_c/P_i atau A_c/P dan mendefinikan $\sigma_{gi} = P_i/A_c$ atau, $\sigma_g = P/A_c$ maka persamaan dapat ditulis kembali menjadi sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} e_o - \frac{M_{min}}{P_i} &\leq k_b \left(\frac{\overline{\sigma}_t}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \\ e_o - \frac{M_{min}}{P_i} &\leq k_t \left(\frac{\overline{\sigma}_c}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \end{aligned} \right\} k_b'$$

$$\left. \begin{aligned} e_o - \frac{M_{\max}}{P} &\geq k_b \left(\frac{\sigma_{cs}}{\sigma_g} + 1 \right) \\ e_o - \frac{M_{\max}}{P} &\geq k_t \left(\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_g} + 1 \right) \end{aligned} \right\} k_t'$$



Gambar 2-5 Limit kern dan daerah aman kabel

2.5.3 Daerah aman kabel

Daerah aman kabel adalah daerah sepanjang balok dimana bila kabel ditempatkan pada daerah tersebut tidak akan menyebabkan terjadinya tegangan yang melebihi tegangan izinnnya (baik tarik maupun tekan).

Dari persamaan di atas dapat diperoleh:

$$e_o - M_{\max}/P \geq k_t'$$

$$e_o - M_{\min}/P_i \leq k_b'$$

Maka nilai e_o berada pada

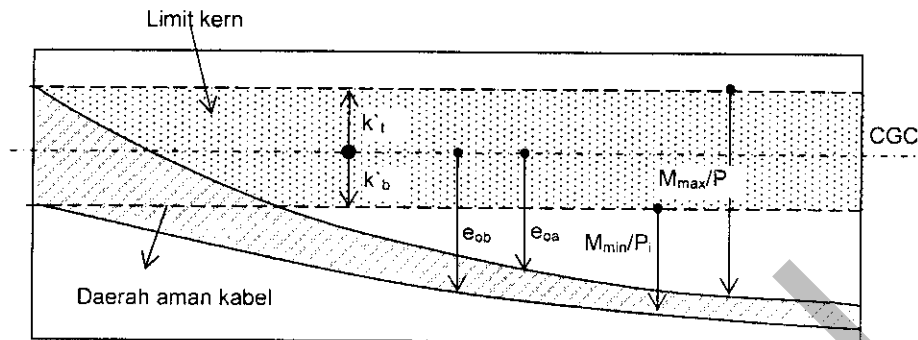
$$k_t' + M_{\max}/P \leq e_o \leq k_b' + M_{\min}/P_i$$

Daerah aman atas (e_{oa}) dan bawah (e_{ob}) didefinisikan sebagai berikut:

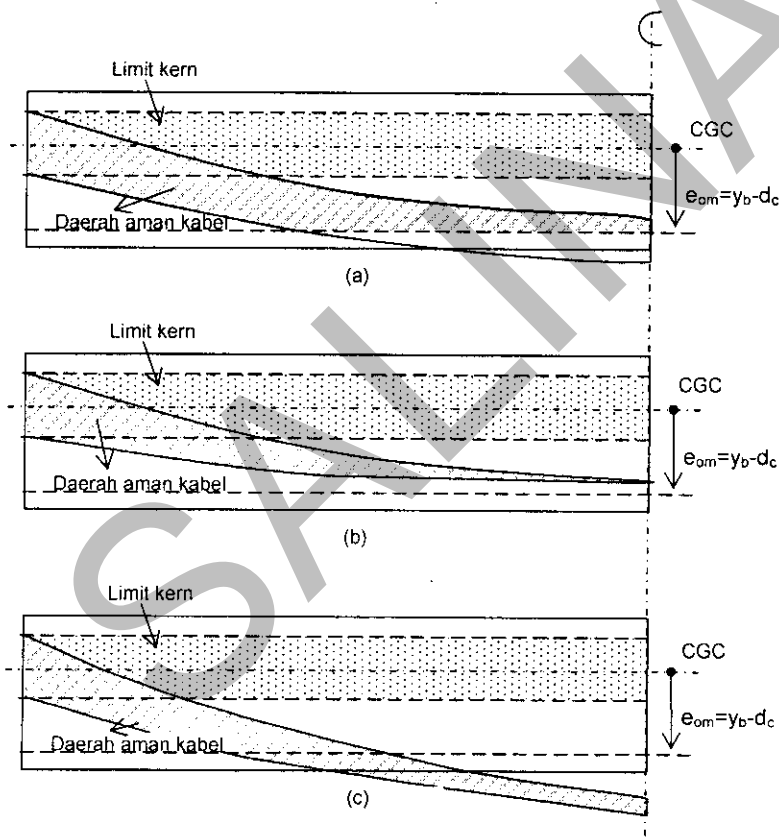
$$e_{oa} = k_t' + M_{\max}/P$$

$$e_{ob} = k_b' + M_{\min}/P_i$$

Hubungan limit kern dengan daerah aman diperlihatkan pada gambar 3-6.



Gambar 2-6 Hubungan limit kern dengan daerah aman kabel



Gambar 2-7 Bentuk tipikal daerah aman kabel

- (a). Desain normal
- (b). Desain optimum (hanya ada satu solusi P dan e_o).
- (c). Penampang tidak kuat (preliminary).

Contoh 2.2:

Balok pada Contoh 2.1 akan digunakan untuk menghitung daerah *limit kern* dan daerah aman kabel.

1. Tegangan akibat prategang

$$\sigma_g := \frac{P}{A_c} \quad \sigma_g = 2.917 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{gi} := \frac{P_i}{A_c} \quad \sigma_{gi} = 3.514 \text{ MPa}$$

2. Limit Kern

$$k'_t := \max \begin{bmatrix} k_b \cdot \left(\frac{\sigma_{cs}}{\sigma_g} + 1 \right) \\ k_t \cdot \left(\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_g} + 1 \right) \\ k_b \cdot \left(\frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \\ k_t \cdot \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \end{bmatrix} \quad k'_t = -0.221 \text{ m}$$

$$k'_b := \min \begin{bmatrix} k_b \cdot \left(\frac{\sigma_{cs}}{\sigma_g} + 1 \right) \\ k_t \cdot \left(\frac{\sigma_{ts}}{\sigma_g} + 1 \right) \\ k_b \cdot \left(\frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \\ k_t \cdot \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{gi}} + 1 \right) \end{bmatrix} \quad k'_b = 0.15 \text{ m}$$

3. Daerah aman kabel

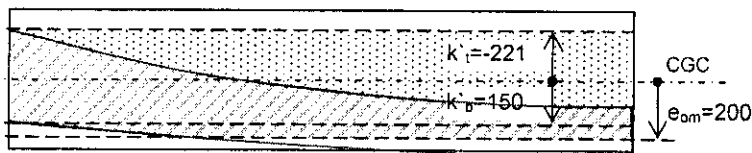
$$e_{oa} := k'_t + \frac{M_{max}}{P} \quad e_{oa} = 70.21 \text{ mm}$$

$$e_{ob} := k'_b + \frac{M_{DL}}{P_i} \quad e_{ob} = 278.363 \text{ mm}$$

$$dc := 100 \text{ mm}$$

$$e_{om} := y_b - dc \quad e_{om} = 200 \text{ mm}$$

Jadi daerah aman kabel berada pada $70.21 \text{ mm} \leq e_o \leq 200 \text{ mm}$



2.6 Lendutan dan camber

Karena adanya eksentrisitas kabel prategang, elemen balok prategang biasanya melengkung ke atas pada saat momen luar yang bekerja masih kecil. Defleksi ke atas ini disebut *camber*. Nilai camber ini dapat membesar atau mengecil dengan bertambahnya waktu. Sebaliknya beban luar yang bekerja akan menyebabkan defleksi ke bawah pada balok.

Perjanjian tanda untuk defleksi diatur sebagai berikut:

(+) defleksi atau melendut ke bawah

(-) defleksi atau melendut ke atas

Dalam perencanaan, besarnya defleksi ke atas dan ke bawah harus diperiksa dan dibatasi agar tidak melampaui batas defleksi yang diizinkan. Khusus untuk jembatan, acuan mengenai batasan defleksi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2-2 (BMS).

Tabel 2-2 Batasan Defleksi Berdasarkan BMS (l = panjang bentang)

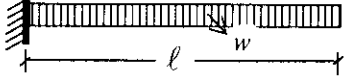
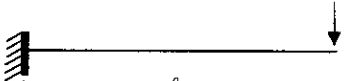
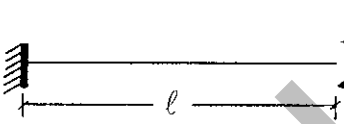
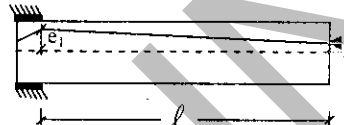
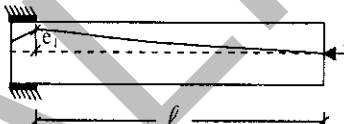
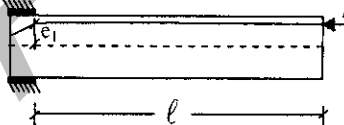
Jenis Elemen	Defleksi yang Ditinjau	Defleksi Maksimum yang Diizinkan	
		Beban Kendaraan	Beban Kendaraan + Pejalan Kaki
Bentang sederhana atau menerus	Defleksi seketika akibat beban hidup layan dan beban dampak	$l/800$	$l/1000$
Kantilever		$l/400$	$l/375$

Untuk elemen beton prategang yang belum retak, defleksi dan camber dapat dihitung dengan menggunakan persamaan elastis seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2-3 dan Tabel 2-4.

Tabel 2-3 Defleksi Akibat Pembebanan dan Gaya Prategang Pada Balok Sederhana.

Kondisi Pembebanan dan Profil Tendon	Defleksi di Tengah Bentang Δ
Beban Merata	$\Delta = \frac{5}{384} \frac{w \ell^4}{EI}$
Beban Terpusat (1)	$\Delta = \frac{1}{48} \frac{P \ell^3}{EI}$
Beban Terpusat (2)	$\Delta = \frac{1}{24} \frac{P b (3 \ell^2 - 4 b^2)}{EI}$
Eksentrisitas Konstan	$\Delta = \frac{1}{8} \frac{P e \ell^2}{EI}$
Titik Harping Tunggal	$\Delta = \frac{2 e_c + e_e}{24} \frac{P \ell^2}{EI}$
Titik Harping Ganda	$\Delta = \left[\frac{e_c}{8} - \frac{\beta^2}{6} (e_c - e_e) \right] \frac{P \ell^2}{EI}$
Profil Parabola	$\Delta = \left[e_e + \frac{5}{6} (e_c - e_e) \right] \frac{P \ell^2}{8 EI}$

Tabel 2-4 Defleksi Akibat Pembebanan dan Gaya Prategang Pada balok kantilever

Kondisi Pembebanan dan Profil Tendon		Defleksi di Tengah Bentang Δ
Beban Merata		$\Delta = \frac{1}{8} \frac{w \ell^4}{EI}$
Beban Terpusat		$\Delta = \frac{1}{3} \frac{P \ell^3}{EI}$
Beban Momen		$\Delta = \frac{1}{2} \frac{M \ell^2}{EI}$
Eksentrisitas gradual		$\Delta = -\frac{P \ell^2}{2EI} \left(e_2 + \frac{2(e_1 - e_2)}{3} \right)$
Eksentrisitas parabolik		$\Delta = -\frac{P e_1 \ell^2}{4EI}$
Eksentrisitas konstan		$\Delta = -\frac{P e_1 \ell^2}{4EI}$

Pengaruh jangka panjang akibat rangkai dan susut pada estimasi camber dan defleksi dapat diperhitungkan dengan menerapkan faktor pengali pada Tabel 2-5.

Tabel 2-5 Faktor Pengali untuk Perhitungan Camber dan Defleksi Jangka Panjang

	Tanpa Topping Komposit	Dengan Topping Komposit
Pada Tahapan Ereksi		
(1) Komponen defleksi - diberlakukan pada defleksi elastik akibat berat sendiri.	1,85	1,85
(2) Komponen camber - diberlakukan pada camber elastik akibat prategang.	1,80	1,80
Pada Tahapan Akhir		
(3) Komponen defleksi - diberlakukan pada defleksi elastik akibat berat sendiri.	2,70	2,40
(4) Komponen camber - diberlakukan pada defleksi camber elastik akibat prategang.	2,45	2,20
(5) Defleksi - diberlakukan pada defleksi elastik akibat beban mati tambahan.	3,00	3,00
(6) Defleksi - diberlakukan pada defleksi elastik yang disebabkan topping komposit.	-	2,30

Untuk penampang yang retak, penggunaan momen inersia I_g dalam perhitungan defleksi akan menghasilkan nilai defleksi dan camber yang lebih kecil dari yang seharusnya. Oleh karena itu, Nilai I_g hanya boleh digunakan pada penampang yang belum retak, sedangkan pada penampang yang retak harus digunakan nilai inersia retak (I_{cr}). Cara yang lebih sederhana untuk menghitung defleksi pada balok yang sebagian penampangnya sudah mengalami retak adalah dengan menggunakan konsep momen inersia efektif yang merupakan nilai inersia rata-rata di sepanjang bentang balok.

Contoh 2.3:

Balok pada Contoh 2.1 akan digunakan untuk memeriksa lendutan.

Diketahui :

Mutu beton initial

$$f_c = 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ci} := 0.65 \cdot f_c \quad f_{ci} = 32.5 \text{ MPa}$$

Modulus elastisitas beton

$$E_c := 4700 \cdot \sqrt{f_c \cdot (\text{MPa})} \quad E_c = 33234.019 \text{ MPa}$$

$$E_{ci} := 4700 \cdot \sqrt{f_{ci} \cdot (\text{MPa})} \quad E_{ci} = 26794.122 \text{ MPa}$$

Beban layan

$$\text{beban mati} \quad q_{DL} = 4.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{beban hidup} \quad q_L := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

a. Lendutan awal (initial)

Chamber akibat prestress saja $e = 0.2 \text{ m}$

$$\Delta_{pi} := \frac{-5 \cdot P_i \cdot e \cdot L^2}{48 \cdot E_{ci} \cdot I} \quad \Delta_{pi} = -13.115 \text{ mm (ke atas)}$$

defleksi akibat berat sendiri

$$\Delta_{bs} := \frac{5 \cdot (q_{DL}) \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I} \quad \Delta_{bs} = 6.77 \text{ mm (ke bawah)}$$

defleksi jangka panjang oleh PCI Multipliers

$$\Delta_1 := 1.85 \cdot \Delta_{bs} + 1.8 \cdot \Delta_{pi} \quad \Delta_1 = -11.082 \text{ mm (ke atas)}$$

b. Lendutan akhir

defleksi akibat beban hidup merata, qLL

$$\Delta_L := \frac{5 \cdot (q_L) \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I} \quad \Delta_L = 3.761 \text{ mm (ke bawah)}$$

$$\text{kontrol defleksi, } \Delta_L < \frac{L}{800} = 15 \text{ mm OK!}$$

defleksi jangka panjang total :

$$\Delta_2 := 2.45 \cdot \Delta_{pi} + 2.7 \cdot \Delta_{bs} \quad \Delta_2 = -13.852 \text{ mm (ke atas)}$$

defleksi total

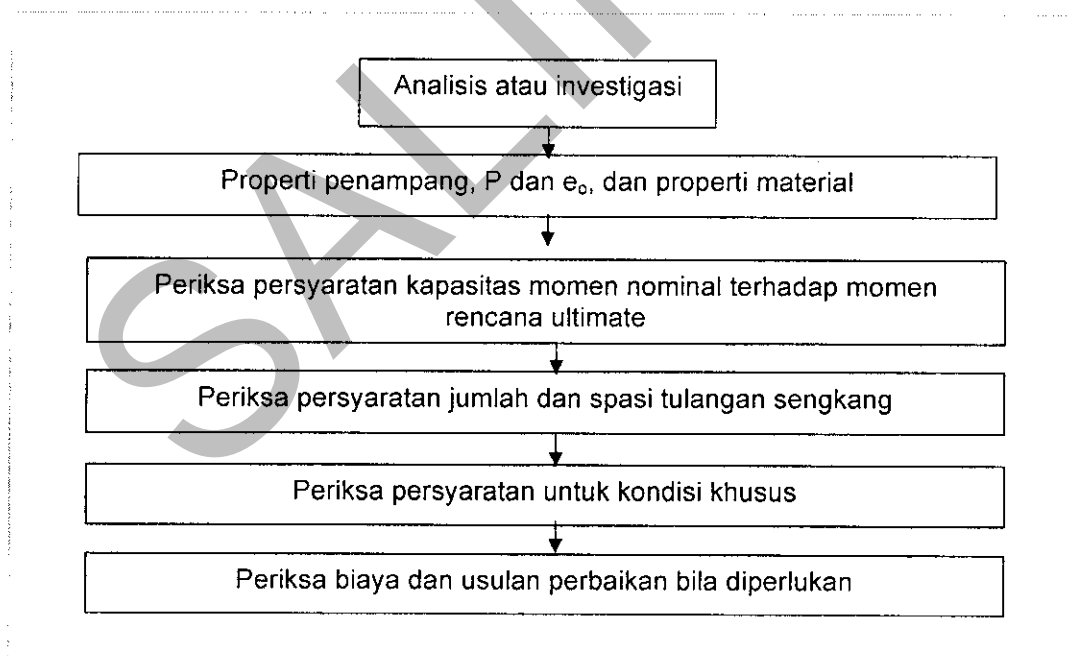
$$\Delta_{tot} := \Delta_2 - \Delta_1 + \Delta_L \quad \Delta_{tot} = 0.991 \text{ mm (ke bawah)}$$

3 PERENCANAAN BERDASARKAN BATAS KEKUATAN TERFAKTOR (PBKT)

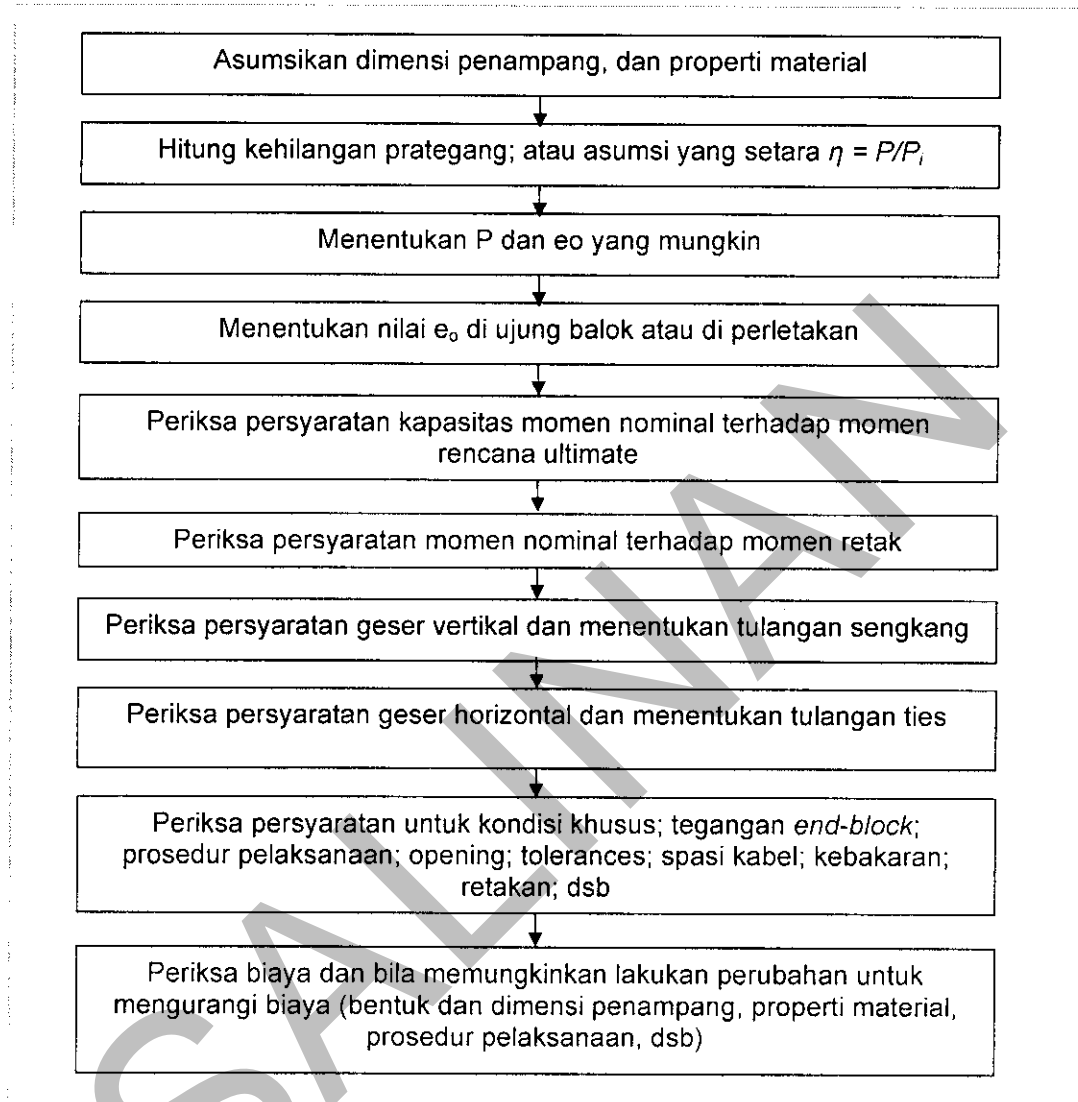
3.1 Umum

Analisis atau investigasi elemen struktur prategang berdasarkan batas kekuatan terfaktor (PBKT) seperti terlihat pada gambar 3.1 meliputi sebagai berikut :

1. Pemilihan tipe penampang (misalnya untuk balok terdapat I, Box) sebagai preliminari desain. Jembatan dengan bentang standar yaitu kurang dari 50 m sebaiknya menggunakan penampang standard dari binamarga atau penampang lainnya yang dapat disetujui direksi teknik.
2. Tentukan gaya prategang, P dari jumlah kabel dan tegangan putus kabel.
3. Tentukan eksentrisitas kabel, e_o .
4. Hitung momen nominal penampang beton prategang (lihat sub bab 3.2).
5. Periksa momen kapasitas lebih besar momen ultimate rencana, $\phi M_n \geq M_u$
6. Periksa jumlah dan spasi tulangan geser terhadap gaya geser rencana, V_u



Gambar 3.1 Langkah-langkah analisis atau investigasi lentur dalam PBKT



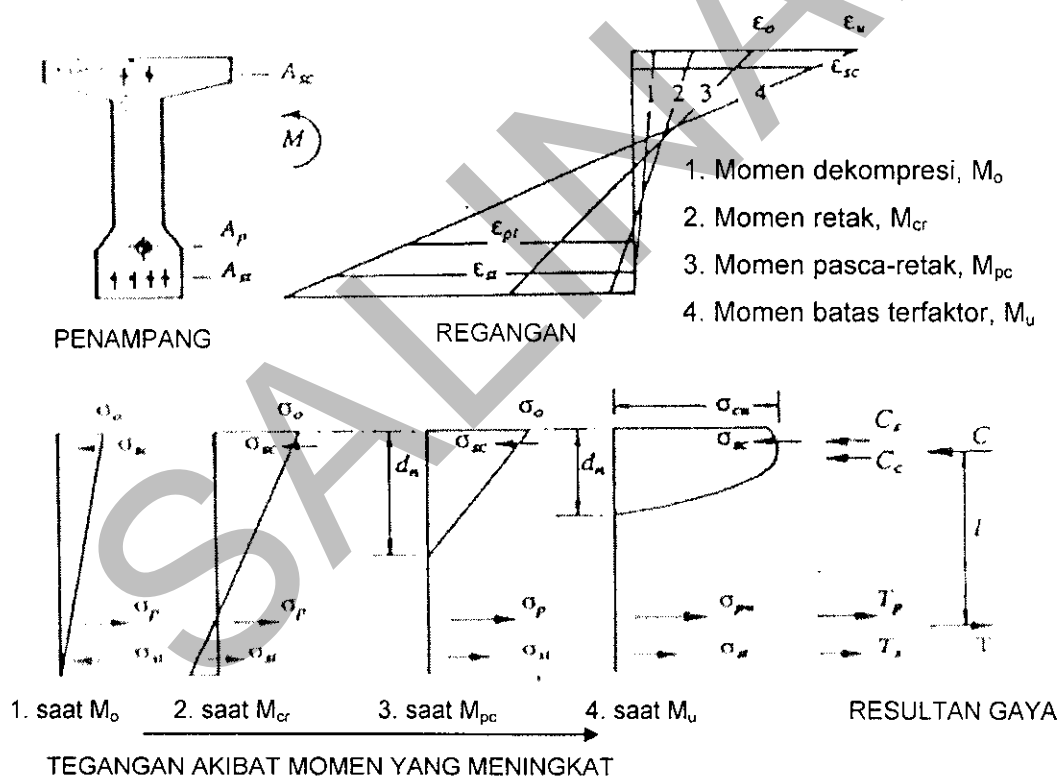
Gambar 3.2 Langkah-langkah dalam desain lentur

Berbeda dengan analisis yang harus sesuai benar dengan kondisi penampang yang ada, mendesain sebuah elemen lentur beton prategang berarti menentukan jumlah kabel prategang, profile kabel prategang, memeriksa kapasitas momen lentur dan geser, tegangan end-block yang bersifat trial and error berbentuk siklus sampai semua persyaratan lentur dan geser terpenuhi. Langkah-langkah desain lentur balok prategang dapat dilihat pada gambar 3.2

3.2 Momen nominal lentur, M_n

Kekuatan batas nominal lentur adalah kekuatan penampang beton dalam menahan kombinasi beban terfaktor (beban *ultimate*).

Prinsip dan teori perencanaan beton prategang dalam PBKT pada dasarnya sama dengan beton bertulang bila mana momen lentur yang terjadi melebihi momen retaknya M_{cr} dan momen layan total M_T . Sama halnya dengan beton bertulang, filosofi perencanaan mensyaratkan bahwa elemen struktur beton tidak mengalami keruntuhan (*failure*) sebelum kapasitas rencana tercapai, dan juga mensyaratkan elemen struktur tersebut mempunyai daktilitas yang cukup sebelum runtuh.



Gambar 3-3 Perilaku Beton Prategang terhadap Momen yang Meningkat

Berikut ini akan dijelaskan penampang beton prategang berdasarkan perencanaan batas kekuatan terfaktor seperti dalam Gambar 3-3. Penampang tersebut berisi tulangan

beton non-prategang tarik dan tekan, dan tulangan prategang terlekat (*bonded*). Ditunjukkan pula dalam gambar tersebut distribusi tegangan dan regangan untuk empat jenis nilai berbeda momen yang teraplikasi. Dengan meningkatnya momen dari level layan (*service level*) sampai mencapai batas *overload*, garis netral, *c* meningkat secara bertahap dan pada akhirnya perilaku material beton menjadi *non-linear*. Baja tulangan non-prategang tarik akan mengalami leleh bila regangan baja, ϵ_{st} mencapai regangan lelehnya ($\epsilon_y = f_y/E_s$), tulangan prategang akan memasuki bagian non-linear dalam kurva tegangan-regangan seiring dengan meningkatnya ϵ_p regangan prategang, dan distribusi tegangan tekan beton menjadi non linear bila tegangan pada serat tekan terluar melebihi nilai sekitar $0.5f_c$.

Pada saat beban *ultimate tercapai*, tegangan aktual beton non-linear yang berbentuk parabolik menurut peraturan RSNI T-12-2004 dapat diidealisasi menjadi persegi dengan besar tegangan $\sigma_{cu} = 0.85f_c$ dan tinggi blok tekan, $a = \beta_1 * c$.

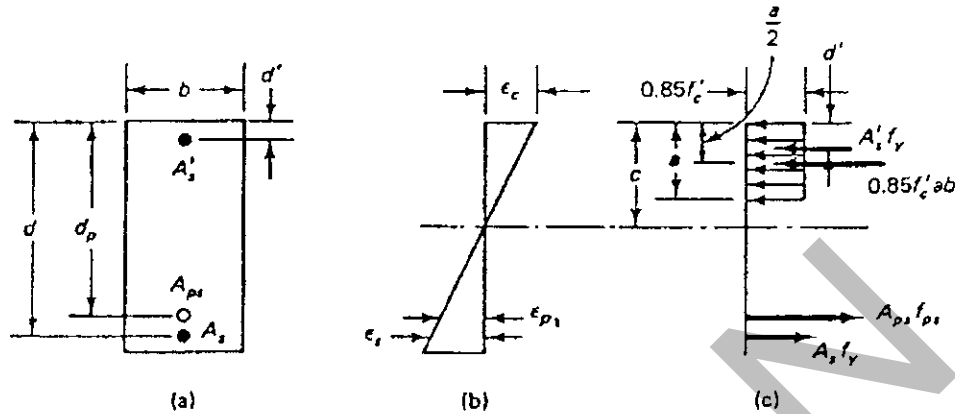
Untuk memenuhi prinsip keseimbangan gaya-gaya horizontal, Resultan gaya-gaya tekan *C* dan resultan gaya-gaya tarik *T* pada gambar 3-1 haruslah seimbang satu sama lainnya. Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = C \quad (3-1)$$

Kapasitas momen *ultimate* dihasilkan dari kopel gaya-gaya internal (*T* dan *C*), sebagai berikut:

$$M_u = C l = T l \quad (3-2)$$

3.2.1 Momen Nominal Penampang persegi



Gambar 3-4 Regangan, tegangan dan gaya penampang persegi
(a) penampang (b) regangan (c) tegangan dan gaya

Persamaan keseimbangan (equilibrium) gaya horizontal,

$$T = C$$

$$A_s f_y + A_{ps} f_{ps} = 0.85 f'_c a b + A'_s f_y$$

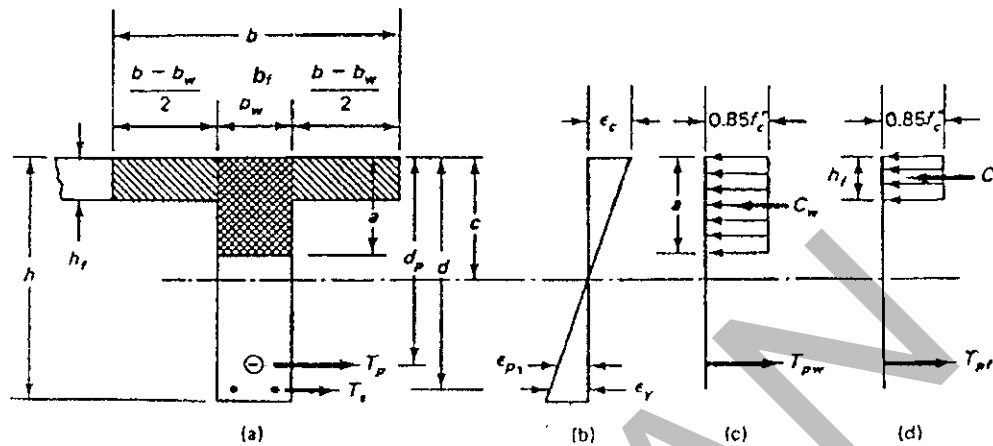
$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - A'_s f_y}{0.85 f'_c b_w} \quad (3-3)$$

Momen nominal dihasilkan dari kopel gaya-gaya internal horizontal sebagai berikut:

$$M_u = C l = T l$$

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \cdot (d_p - a/2) + A_s f_y \cdot (d - a/2) + A'_s f_y \cdot (a/2 - d') \quad (3-4)$$

3.2.2 Momen Nominal Penampang Berflens



Gambar 3-5 Regangan, tegangan dan gaya penampang flens

(a) penampang (b) regangan (c) tegangan dan gaya badan (d) tegangan dan gaya flens

Persamaan keseimbangan (equilibrium) gaya horizontal,

$$T = C$$

$$A_s f_y + A_{ps} f_{ps} = 0.85 f'_c a b_w + 0.85 f'_c h_f (b_f - b_w)$$

$$A_{pw} f_{ps} = 0.85 f'_c a b_w = A_s f_y + A_{ps} f_{ps} - 0.85 f'_c h_f (b_f - b_w)$$

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps} + A_s f_y - 0.85 f'_c h_f (b_f - b_w)}{0.85 f'_c b_w} = \frac{A_{pw} f_{ps}}{0.85 f'_c b_w} \quad (3-5)$$

Momen nominal dihasilkan dari kopel gaya-gaya internal horizontal sebagai berikut:

$$M_u = C l = T l$$

$$M_n = A_{pw} f_{ps} \cdot (d_p - a/2) + A_s f_y \cdot (d - d_p) + 0.85 f'_c (b_f - b_w) h_f \cdot (d_p - h_f/2) \quad (3-6)$$

3.2.3 Penampang Komposit

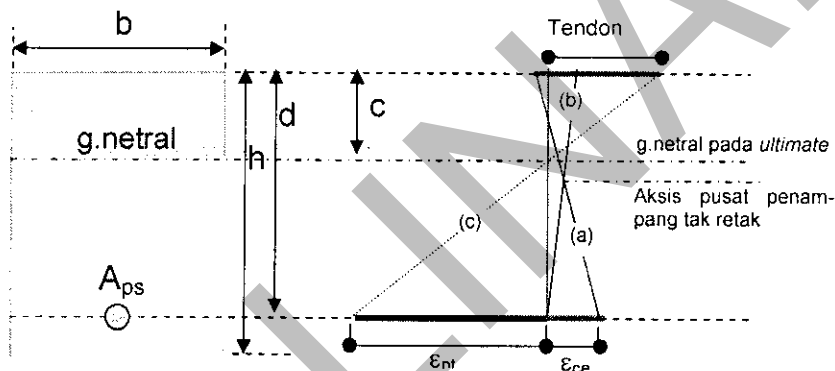
Pelat lantai jembatan dapat diperhitungkan sebagai penampang komposit dengan balok girdernya, dengan catatan menggunakan lebar efektif pelat. Lebar efektif pelat perlu dihitung oleh karena perbedaan mutu beton antara beton girder dan pelat. Dengan demikian, penampang komposit dapat dihitung sebagai penampang berflens dengan lebar sayap sama dengan lebar efektif pelat (lihat sub bab 3.2.2 momen nominal untuk penampang berflens).

3.2.4 Menentukan Tegangan Nominal Baja Prategang pada Saat Runtuh, f_{ps}

Tegangan nominal baja tulangan prategang pada saat penampang mencapai kondisi *ultimate* (runtuh), f_{ps} dapat ditentukan sebagai berikut:

- a) Prosedur kompatibilitas regangan jika $f_{pe} = \frac{P_e}{A_{ps}} < 0.50 f_{pu}$

Pada penampang beton bertulang, regangan dalam tulangan non-prategang dan beton pada level tulangan adalah sama untuk setiap tahapan pembebanan. Lain halnya dengan tulangan prategang, regangan dalam tulangan prategang adalah sama dengan regangan akibat prategang initial ditambah regangan akibat perubahan dalam beton pada level tulangan.



Gambar 3-6 Distribusi regangan pada tiga tahapan pembebanan

Tahap (a) pada Gambar 3-6 menunjukkan regangan elastik beton akibat gaya prategang efektif pada kondisi momen eksternal nol. Regangan dalam beton pada level tulangan adalah sebagai berikut:

$$\epsilon_{ce} = -\frac{1}{E_c} \left(\frac{P_e}{A} + \frac{P_e e^2}{I} \right) \quad (3-7)$$

Dimana A adalah luas penampang beton dan I adalah momen inersia penampang beton. Tegangan dan regangan efektif dalam tulangan prategang pada saat beban layan adalah:

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A_p} \quad \text{dan} \quad \epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_p} \quad (3-8)$$

Tahap (b) menunjukkan distribusi regangan beton di level prategang pada saat bekerja momen yang cukup untuk dekompresi beton. Besarnya regangan sama dengan tahap (a) plus peningkatan regangan tarik sebesar ε_{ce} (dari pers. 3-7).

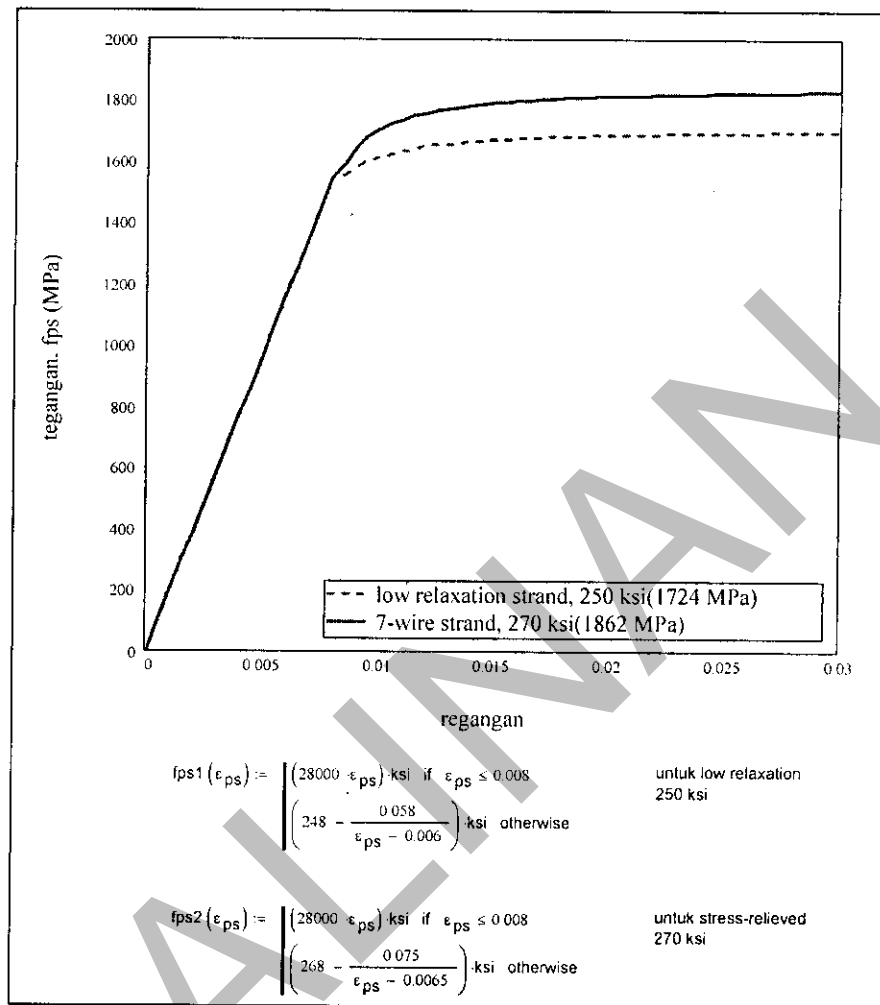
Tahap (c) pada gambar di atas berhubungan dengan kondisi beban *ultimate* (runtuh). Regangan dalam beton pada level tulangan ε_{pt} dapat ditentukan dengan variabel regangan tekan serat terluar beton sebesar ε_{cu} dan tinggi garis netral c sebagai berikut :

$$\varepsilon_{pt} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_p - c}{c} \right) \quad (3-9)$$

Dengan demikian, regangan total dalam tendon prategang pada kondisi beban *ultimate* (runtuh) dapat diperoleh sebagai berikut:

$$\varepsilon_{pu} = \varepsilon_{pe} + \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{pt} \quad (3-10)$$

Bila regangan dalam tendon prategang pada kondisi runtuh ε_{pu} diketahui maka tegangan dalam tendon prategang pada kondisi runtuh juga dapat diperoleh dari grafik tegangan – regangan pada gambar 3-7.



Gambar 3-7 Kurva tegangan-regangan 7-wire stress-relieved dan low relaxation (Nawy, 1996)

- b) Prosedur pendekatan empirik jika $f_{pe} = \frac{P_e}{A_{ps}} > 0.50 f_{pu}$

Prosedure ini secara umum lebih konservatif dan dapat digunakan sebagai pengganti perhitungan tegangan yang lebih akurat berdasarkan kompatibilitas regangan.

Bonded tendon :

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left(\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right) \right] \quad (3-11)$$

Unbonded tendon :

Jika rasio bentang terhadap tinggi penampang ≤ 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + f'_c / (100 \rho_p) \quad (3-12)$$

Jika rasio bentang terhadap tinggi penampang > 35

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + f'_c / (300 \rho_p) \quad (3-13)$$

Dimana :

- ω = indeks tulangan baja konvensional tarik, $\omega = \rho f_y / f'_c$
- ω' = indeks tulangan baja konvensional tekan, $\omega' = \rho' f_y / f'_c$
- ω_p = indeks tulangan baja konvensional tekan, $\omega_p = \rho_p f_{ps} / f'_c$
- ρ = rasio tulangan tarik non-prategang terhadap luas penampang beton.
- ρ' = rasio tulangan tekan terhadap luas penampang beton.
- ρ_p = rasio tulangan prategang terhadap luas penampang beton.
- f_{pe} = tegangan efektif prategang (setelah losses), MPa.
- f_{pu} = kuat tarik baja prategang, MPa.
- P_e = Gaya prategang efektif (setelah losses), N
- A_{ps} = luas tulangan prategang, mm²

3.2.5 Preliminari Desain Ultimate

Untuk penyederhanaan, Asumsikan :

hanya ada tulangan prategang saja, tanpa tulangan baja biasa.

Lengan momen, $jd = 0.8h$

Tegangan nominal prategang, $f_{ps} = 0.9f_{pu}$

Berdasarkan asumsi tersebut momen nominal pada persamaan (3-4) dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \cdot (d_p - a / 2) = A_{ps} 0.9f_{pu} \cdot (0.8h) = A_{ps} 0.72f_{pu} \cdot h$$

Maka luas tulangan prategang untuk preliminari (desain awal) dapat diperoleh dari kebutuhan tegangan final atau kebutuhan momen rencana ultimate, M_n sebagai berikut,

$$A_{ps} = \frac{M_n}{0.72 f_{pu} \cdot h} \quad (3-14)$$

Jika tinggi blok tekan beton a sama dengan tinggi flens h_f , maka luas tekan beton $A_c' = b \cdot a$.

$$C = 0.85 f_c' A_c'$$

$$T = f_{ps} A_{ps} = M_n / (0.8h)$$

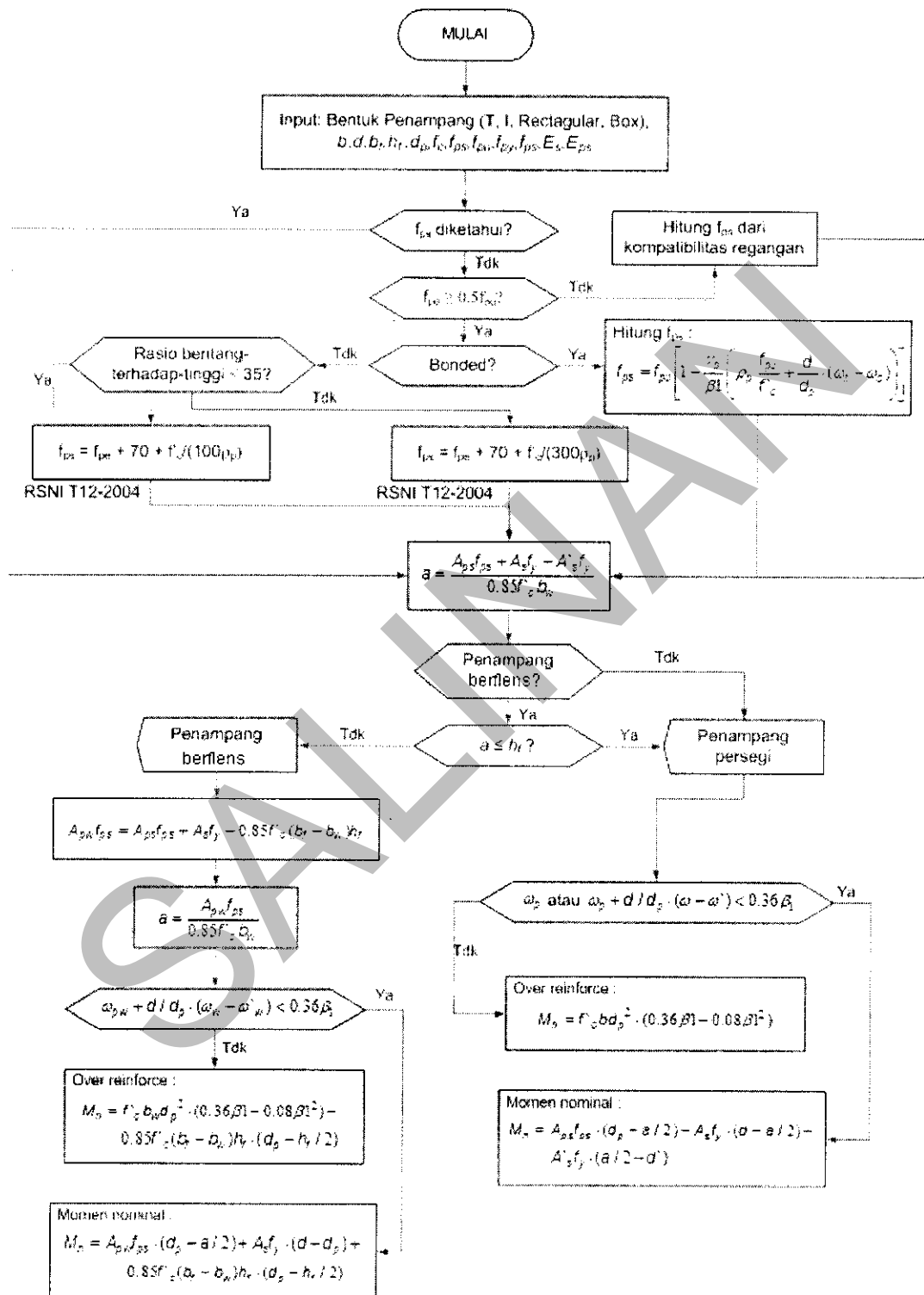
Dari persamaan keseimbangan gaya $C=T$, maka luas tekan flens adalah :

$$A_c' = \frac{M_n}{0.8h \cdot 0.85 f_c'} = \frac{M_n}{0.68h \cdot f_c'} \quad (3-15)$$

3.2.6 Langkah-Langkah Desain Member Prategang Kondisi Ultimate

Langkah-langkah mendesain member prategang pada kondisi *ultimate* dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Tentukan dimensi penampang. Tinggi penampang, $h = 1/20 L$, atau dari **Tabel 1-2** bila menggunakan penampang AASHTO. Dimana L = panjang span.
2. Menghitung gaya dalam momen layan, momen dan geser *ultimate*. Masing-masing yaitu M_l , M_u dan V_u .
3. Tentukan dimensi pelat. Pilih tinggi flens h_f dengan rumus pada pers. (3-15) dan lebar pelat efektif.
4. Menghitung sifat penampang komposit girder dan pelat
5. Estimasi luas tulangan prategang, A_{ps} berdasarkan rumus pada pers. (3-14).
6. Hitung momen nominal, M_n (lihat *flowchart*).
 - Pilih ukuran dan spasi tulangan non prategang
 - Periksa juga tulangan baja minimum, $A_s > 0.004 A$ (bila tidak prategang penuh)
7. Periksa momen desain $\phi M_n \geq M_u$.
8. Periksa momen desain minimum perlu, $\phi M_n > 1.2 M_{cr}$ untuk memastikan kecukupan tulangan tarik baja non prategang khususnya pada tendon unbonded.



Gambar 3-8 Flowchart Momen Nominal

3.2.7 Contoh Perhitungan Desain Member Prategang Kondisi Ultimate

CONTOH 3.1a	DESAIN BALOK PRATEGANG	1 1
SOAL : Desain jembatan bentang 36 m dengan balok girder T-Bulb AASHTO.		
DIBERIKAN : Panjang bentang jembatan $Lsl = 36 \cdot m$ Jarak antar balok (as ke as) $Lc = 2.10m$ Material a. Beton : <u>Girder Pracetak</u> $f_c = 45.65MPa$ $f_c = 45.65 \cdot MPa$ $E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c \cdot (MPa)}$ $E_c = 31755.448 \cdot MPa$ $f_y = 400 \cdot MPa$ <u>Pelat :</u> $f_{cp} = 29 \cdot MPa$ $E_{cp} = 4700 \cdot \sqrt{f_{cp} \cdot (MPa)}$ $E_{cp} = 25310.275 \cdot MPa$		

b. Kabel Prategang (Jenis Relaksasi Rendah)

$$f_{pu} = 1860 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{py} = 0.9 f_{pu}$$

$$f_{py} = 1674 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{pj} = 0.75 \cdot f_{pu}$$

$$f_{pj} = 1395 \cdot \text{MPa}$$

(maks.)

$$f_{pi} = 0.7 \cdot f_{pu}$$

$$f_{pi} = 1302 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{peff} = 0.8 \cdot f_{pi}$$

$$f_{peff} = 1041.6 \cdot \text{MPa}$$

(asumsi
losses 20%)

$$E_{ps} = 195000 \cdot \text{MPa}$$

Diameter Tendon

$$\phi_s = 12.7 \cdot \text{mm}$$

Luas efektif per tendon

$$A_{p1} = 98 \text{mm}^2$$

LANGKAH 1: Menentukan Dimensi Penampang

Penampang : *AASHTO Tipe VI*

$$h = 1828.8 \text{ mm}$$

$$b_f = 1066.8 \text{ mm}$$

$$x_1 = 127 \text{ mm}$$

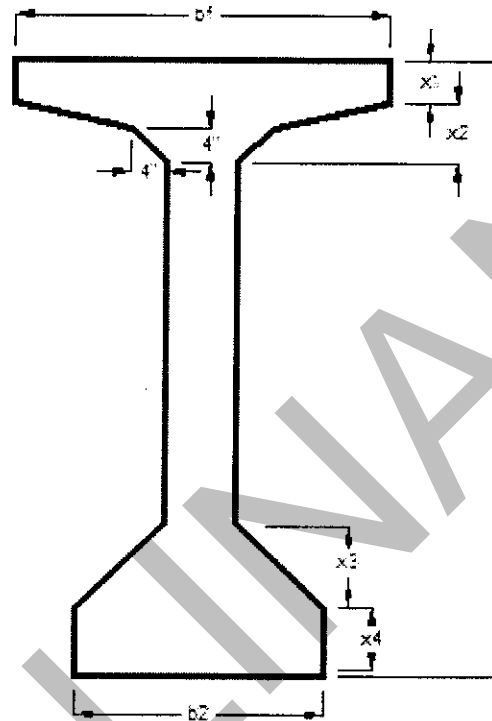
$$x_2 = 177.8 \text{ mm}$$

$$b_2 = 711.2 \text{ mm}$$

$$x_3 = 254 \text{ mm}$$

$$x_4 = 203.2 \text{ mm}$$

$$b_w = 203.2 \text{ mm}$$



AASHTO TYPE VI

Momen inersia $I_c = 3.052 \times 10^{11} \text{ mm}^4$

Luas Penampang $A_c = 6.999986 \times 10^5 \text{ mm}^2$

Garis Berat Bawah $C_b = 924.068 \text{ mm}$

Garis Berat Atas $C_t = h - C_b$ $C_t = 904.732 \text{ mm}$

Sec. Modulus Top $S_t = \frac{I_c}{C_t}$ $S_t = 3.374 \times 10^8 \text{ mm}^3$

Sec. Modulus Bottom $S_b = \frac{I_c}{C_b}$ $S_b = 3.303 \times 10^8 \text{ mm}^3$

RSNI-T12-04

Pasal 5.1.1.1

Faktor β_1 tergantung dari mutu beton, jika kurang dari 30 MPa nilainya 0.85, namun jika f_c' lebih besar 30 MPa nilainya berkurang secara proporsional tapi tidak lebih kecil dari 0.65.

Radius Girasi	$r = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}}$	$r = 660.337 \text{ mm}$	
	$k_b = \frac{r^2}{C_t}$	$k_b = 481.961 \text{ mm}$	
	$k_t = \frac{r^2}{C_b}$	$k_t = 471.876 \text{ mm}$	
tebal pelat total (asumsi - trial)		$h_{slb} = 220 \text{ mm}$	
LANGKAH 2: Gaya Dalam			
Faktor reduksi lentur		$\phi = 0.8$	
Faktor reduksi geser		$\phi_v = 0.75$	
Berat jenis beton		$\gamma_c = 24 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	
Berat jenis beton prategang		$\gamma_{pt} = 25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	
Berat jenis baja		$\gamma_s = 78.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	
Resume gaya dalam M + V dalam girder			
$M_{sdl} = 2.629 \times 10^3 \text{ kNm}$		$V_{sdl} = 292.068 \text{ kN}$	
$M_{dl} = 2.835 \times 10^3 \text{ kNm}$		$V_{dl} = 314.999 \text{ kN}$	
$M_L = 1.418 \times 10^3 \text{ kNm}$		$V_L = 157.584 \text{ kN}$	
$M_u = 1.3 \cdot (M_{sdl} + M_{dl}) + 2.2 \cdot (M_L)$		$M_u = 1.022 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$	Lihat kombinasi pembebanan pada BMS'92 atau SNI peraturan pembebanan untuk jembatan.
$M_t = 1.0 \cdot (M_{sdl} + M_{dl}) + 1.0 \cdot (M_L)$		$M_t = 6.882 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$	
$V_u = 1.3 \cdot (V_{sdl} + V_{dl}) + 2.2 \cdot (V_L)$		$V_u = 1.136 \times 10^3 \text{ kN}$	
$V_t = 1.0 \cdot (V_{sdl} + V_{dl}) + 1.0 \cdot (V_L)$		$V_t = 764.651 \text{ kN}$	

Keterangan :

MsdI = Momen akibat beban mati superimposed,
seperti pelat lantai dan aspal
Mdl = Momen akibat berat sendiri girder
ML = Momen akibat beban hidup

VsdI = Geser akibat beban mati superimposed,
seperti pelat lantai dan aspal
Vdl = Geser akibat berat sendiri girder
VL = Geser akibat beban hidup

LANGKAH 3: Penentuan Tebal Pelat Lantai Jembatan

Tinggi perlu flens untuk menahan momen Mu

$$Ac' = \frac{Mu}{\phi \cdot 0.68 \cdot h \cdot f_c} \quad Ac' = 2.251 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

bila lebar pelat efektif di atas girder,

$$b_{pl} = L_c \quad b_{pl} = 2100 \text{ mm}$$

maka tebal flens minimum,

$$h_f = \frac{Ac'}{b_{pl}}$$

$$h_f = 107.188 \text{ mm} < h_{slb} = 220 \text{ mm}$$

Ket = "hslb > hf, OK"

Lebar efektif pelat, terkecil dari :

$$b_{pl} = \min \left(\left(b_w + 16 \cdot h_{slb} \quad L_c \quad \frac{L_{sl}}{4} \right) \right) \quad b_{pl} = 2100 \text{ mm}$$

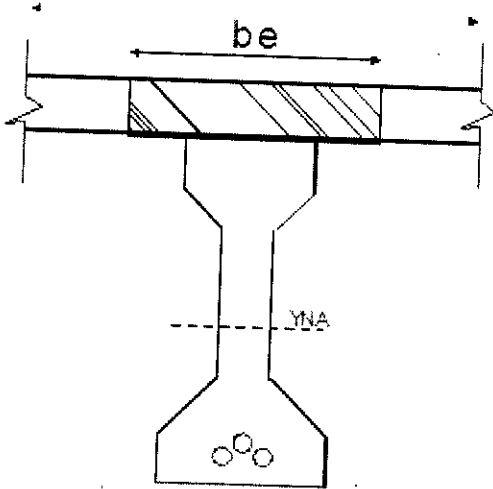
Tebal minimum flens menurut AASHTO

$$t_{min} = \frac{1.2 \cdot (L_c + 3m)}{30}$$

$$t_{min} = 204 \text{ mm} < h_{slb} = 220 \text{ mm} \quad \text{OK !}$$

Ket = "hslb > tmin, OK"

LANGKAH 4: Menghitung Sifat Penampang Komposit



Modulus Elastisitas Girder $E_c = 3.176 \times 10^4 \text{ MPa}$

Modulus Elastisitas Pelat $E_{cp} = 2.531 \times 10^4 \text{ MPa}$

Rasio modulus $n_c = \frac{E_{cp}}{E_c} \quad n_c = 0.797$

Lebar sayap efektif $b_{pl} = 2100 \text{ mm}$

Lebar sayap tranform. $be = n_c \cdot b_{pl} \quad be = 1673.78 \text{ mm}$

Luas Penampang Komposit

$$A_{ck} = A_c + be \cdot h_{slb} \quad A_{ck} = 1.068 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

Garis Berat Bawah Komposit

$$C_{bk} = \frac{be \cdot (h_{slb}) \cdot \left(h + \frac{h_{slb}}{2} \right) + A_c \cdot C_b}{A_{ck}} \quad C_{bk} = 1.274 \times 10^3 \text{ mm}$$

Garis Berat Atas Komposit

$$C_{tk} = h + h_{slb} - C_{bk} \quad C_{tk} = 774.942 \text{ mm}$$

Momen inersia Komposit

$$I_{ck} = I_c + A_c \cdot (C_{bk} - C_b)^2 + \frac{b_e \cdot h_{slb}^3}{12} + b_e \cdot h_{slb} \cdot \left(C_{tk} - \frac{h_{slb}}{2} \right)^2$$

$$I_{ck} = 5.552 \times 10^{11} \text{ mm}^4$$

Sec. Modulus Top $Stk = \frac{I_{ck}}{C_{tk}} \quad Stk = 7.164 \times 10^8 \text{ mm}^3$

Sec. Modulus Bottom $S_{bk} = \frac{I_{ck}}{C_{bk}} \quad S_{bk} = 4.358 \times 10^8 \text{ mm}^3$

LANGKAH 5: Estimasi Luas Prategang

Eksentrisitas Tendon

$$e_m = h - 200\text{mm} - C_t \quad e_m = 724.068\text{mm}$$

Estimasi berdasarkan kondisi tegangan akhir pada serat bawah

$$e = e_m \quad e = 724.068\text{mm} \quad F_t = 0\text{MPa}$$

Nilai awal $P_{eff} = 1 \cdot \text{kN}$

Given
$$\frac{-P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff} \cdot e}{S_b} + \frac{M_{dl} + M_{sdl}}{S_b} + \frac{M_L}{S_{bk}} = F_t$$

$$P_{f2} = \text{Find}(P_{eff})$$

$$P_{f2} = 5467.24\text{kN}$$

Estimasi berdasarkan kekuatan batas penampang

$$A_{ps} = \frac{M_u}{\phi \cdot [0.72f_{pu} \cdot (h + h_{slb})]} \quad A_{ps} = 4.657 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$P_{f3} = A_{ps} \cdot f_{peff} \quad P_{f3} = 4.851 \times 10^3 \text{ kN}$$

Luas perkiraan kabel
Aps dapat diperoleh
dengan menggunakan
persamaan 4-14,
dimana $M_n = M_u / \phi$ dan h
 $= h + h_{slb}$.

<p>Gaya prategang efektif yang dibutuhkan</p> $P_f = \max((P_{f2} \ P_{f3})) \quad P_f = 5.467 \times 10^3 \text{ kN}$ $A_{ps} = \frac{P_f}{f_{peff}} \quad A_{ps} = 5248.886 \text{ mm}^2$ <p>Menentukan jumlah strand</p> $n_{strand} = \text{ceil}\left(\frac{A_{ps}}{A_{p1}}\right) \quad n_{strand} = 54$ $A_{ps} = n_{strand} \cdot A_{p1} \quad A_{ps} = 5292 \text{ mm}^2$	
<p>LANGKAH 6: Menghitung Kapasitas Momen</p> <p>Diameter tulangan $D_s = 16 \text{ mm} \quad \phi = 0.8$</p> <p>Luas per tulangan $A_{s1} = 0.25 \cdot \pi \cdot D_s^2 \quad A_{s1} = 201.062 \text{ mm}^2$</p> <p>Lebar tekan balok $b_t = b_e \quad b_t = 1.674 \times 10^3 \text{ mm}$</p> <p>Jumlah tulangan $n_s = 7 \quad (\text{trial and error})$</p> <p>Luas Total tul. tarik $A_{st} = n_s \cdot A_{s1}$ $A_{st} = 1407.434 \text{ mm}^2$</p> <p><u>Cover beton</u> $d_c = 40 \text{ mm}$</p> <p>Lengan momen prategang komposit $C_t = 904.732 \text{ mm}$ $d_p = C_t + h_{slb} + e_m \quad d_p = 1848.8 \text{ mm}$</p>	

$$P_e = f_{peff} A_{ps} \quad P_e = 5512.147 \text{ kN}$$

$$f_{peff} = 1041.6 \text{ MPa} \geq 0.5 \cdot f_{pu} = 930 \text{ MPa} \quad \dots \text{OK!}$$

maka : Nilai untuk γ_p

	0.55 bila $f_{py}/f_{pu} \geq 0.8$
	0.4 bila $f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$
	0.28 bila $f_{py}/f_{pu} \geq 0.9$

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0.9$$

$$\gamma_p = 0.28$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & \text{if } f_c \leq 30 \cdot \text{MPa} \\ 0.65 & \text{if } f_c \geq 55 \cdot \text{MPa} \\ 0.85 - 0.008 \cdot \left(\frac{f_c}{\text{MPa}} - 30 \right) & \text{if } 30 \cdot \text{MPa} < f_c \leq 55 \cdot \text{MPa} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 0.725$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_{ck}} \quad \rho_p = 0.495\%$$

$$\rho_c = 0 \quad \omega_c = 0$$

$$\rho_t = \frac{A_{st}}{A_{ck}} \quad \rho_t = 0.132\%$$

$$\omega_t = \rho_t \cdot \frac{f_y}{f_c} \quad \omega_t = 0.012$$

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega_t - \omega_c) \right] \right]$$

$$f_{ps} = 1706.044 \text{ MPa}$$

$$\omega_p = \rho_p \cdot \frac{f_{ps}}{f_c} \quad \omega_p = 0.185$$

**Lebar stress blok pada beton
(asumsi garis netral berada di flens)**

$$Tps = fps \cdot Aps \quad Tps = 9.028 \times 10^3 \text{ kN}$$

$$Ts = Ast \cdot fy \quad Ts = 562.973 \text{ kN}$$

$$a = \frac{Tps + Ts}{0.85 \cdot fc \cdot bt} \quad a = 147.68 \text{ mm} < hslb = 220 \text{ mm}$$

(OK, asumsi benar)

Bila asumsi salah maka pendekatan harus diperhitungkan sebagai balok T. Lihat sub bab 4.2.2

Periksa Tulangan Maksimum

Berdasarkan ACI / NAWY (untuk balok segi-4)

$$\omega_p = \rho_p \cdot \frac{fps}{fc} \quad \omega_p = 0.185 < 0.36 \cdot \beta_1 = 0.261$$

OK (jika prategang penuh)

$$\omega_p + \frac{d}{dp} \cdot (\omega_t - \omega_c) = 0.198 < 0.36 \cdot \beta_1 = 0.261$$

OK (jika baja tulangan diperhitungkan)

Notes : jika rasio tulangan $< 0.36 \beta_1$ maka under-reinforced, jika tidak maka over-reinforced.

$$\text{OVER} = \begin{cases} \text{"Y"} & \text{if } \omega_p + \frac{d}{dp} \cdot (\omega_t - \omega_c) > 0.36 \cdot \beta_1 \\ \text{"N"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

OVER = "N"

Berdasarkan AASHTO 3rd Edition 2004, Sec. 5.7.3.3

Kedalaman tulangan efektif pada penampang

$$de = \frac{Aps \cdot fps \cdot dp + Ast \cdot fy \cdot d}{Aps \cdot fps + Ast \cdot fy} \quad de = 1.857 \text{ m}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad c = 203.753 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{de} = 0.11 < 0.42 \text{ OK.}$$

<p> $\text{OVER} = \begin{cases} \text{"Y"} & \text{if } \frac{c}{d_e} > 0.42 \cdot \beta_1 \\ \text{"N"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{OVER} = \text{"N"}$ </p> <p> $M_n = T_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_{st} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$ </p> <p> $M_n = 17102.525 \text{ kN} \cdot \text{m}$ </p>	
<p>LANGKAH 7: Periksa Momen Desain <i>Ultimate</i></p> <p>Momen Nominal $M_n = 17102.525 \text{ kN} \cdot \text{m}$</p> <p>Periksa :</p> <p> $\phi \cdot M_n = 13682.02 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_u = 10222.851 \text{ kN} \cdot \text{m}$ </p> <p>check apakah $\phi M_n > M_u$ jika ya --> OK</p>	
<p>LANGKAH 8: Periksa Momen Desain Minimum Perlu</p> <p> $A_c = 699998.6 \text{ mm}^2 \quad I_c = 3.052 \times 10^{11} \text{ mm}^4$ </p> <p> $P_e = 5.512 \times 10^3 \text{ kN}$ </p> <p> $\text{Tegangan tarik retak } f_r = 0.7 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \text{Mpa} \quad f_r = 4.73 \text{ Mpa}$ </p> <p><u>Menghitung momen retak penampang</u></p> <p>Tegangan serat bawah girder akibat beban layan total, M_t</p> <p> $f_{akt} = \frac{-P_e}{A_c} - \frac{P_e \cdot e}{S_b} + \frac{M_{dl} + M_{sdl}}{S_b} + \frac{M_L}{S_{bk}}$ </p> <p> $f_{akt} = -0.163 \text{ Mpa}$ </p> <p>Momen untuk meretakan penampang adalah</p> <p> $M_{cr} = (f_r - f_{akt}) \cdot S_{bk} + M_t$ </p> <p> $M_{cr} = 9013.961 \text{ kN} \cdot \text{m}$ </p>	

<p>Periksa rasio momen kapasitas terhadap momen retak</p> $\frac{\phi \cdot M_n}{M_{cr}} = 1.52 > 1.2 \text{ ...OK!}$	
---	--

3.3 Perencanaan Balok Terhadap Geser

Aturan perencanaan ini berlaku untuk balok prategang yang mengalami geser V_u , momen lentur M_u dan aksial P_u , atau yang mengalami geser V_u , momen lentur M_u , aksial P_u dan puntir T_u , dengan ketentuan memenuhi persyaratan untuk puntir juga.

Analisis geser balok harus dilakukan dengan cara Perencanaan berdasarkan Beban dan Kekuatan Terfaktor (PBKT).

Pada balok yang tidak prismatis atau tinggi penampangnya bervariasi, perhitungan kekuatan geser harus memperhitungkan komponen gaya tarik atau tekan miring akibat adanya variasi tinggi penampang.

3.3.1 Kekuatan Geser Batas Nominal

Kekuatan geser batas nominal V_n , tidak boleh diambil lebih besar dari jumlah kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton dan tulangan geser dalam penampang komponen struktur yang ditinjau, yaitu:

$$V_n = V_c + V_s$$

3.3.2 Kekuatan Geser Batas Yang Disumbangkan Oleh Beton

Kekuatan geser batas beton V_c tanpa memperhitungkan adanya tulangan geser, tidak boleh diambil melebihi dari nilai terkecil yang diperoleh dari 2 kondisi retak, yaitu retak geser terlentur (V_{ci}) dan retak geser badan (V_{cw}), kecuali jika penampang yang ditinjau mengalami retak akibat lentur, di mana dalam kondisi tersebut hanya kondisi retak geser terlentur yang berlaku.

a). Kondisi retak geser terlentur

Kuat geser V_{ci} harus dihitung dari:

$$V_{cr} = \frac{\sqrt{f'_c}}{20} b_w d + V_d + \frac{\Delta V_u \cdot \Delta M_{cr}}{\Delta M_u}$$

di mana

$$\Delta M_{cr} = Z_b \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{2} + f_{pe} - f_d \right) = \text{momen retak dikurangi momen berat sendiri.}$$

$\Delta V_u = V_{uDL} + V_{uSDL}$ = geser total dikurangi geser berat sendiri.

$\Delta M_u = M_{uDL} + M_{uSDL}$ = momen total dikurangi momen berat sendiri.

$$Z_b = I / y_b$$

tetapi V_{cr} tidak perlu diambil kurang dari $\frac{\sqrt{f'_c}}{7} b_w d$.

b). Kondisi retak geser bagian badan

$$V_{cw} = V_i + V_p$$

di mana:

V_i = gaya geser yang, bila dikombinasikan dengan gaya prategang dan pengaruh aksi lainnya pada penampang, akan menghasilkan tegangan tarik utama sebesar $0,33 \sqrt{f'_c}$ pada sumbu pusat atau perpotongan bagian badan dan sayap, mana yang lebih kritis, atau dapat diambil sebesar:

$$V_i = 0,3 (\sqrt{f'_c} + f_{pc}) b_v d$$

Dimana :

f_{pc} = menyatakan tegangan tekan rata-rata pada beton akibat gaya prategang efektif saja, sesudah memperhitungkan semua kehilangan gaya prategang

b_v = lebar penampang geser

d = tinggi efektif penampang geser

Bila pada komponen struktur pratarik terdapat keadaan di mana penampang yang berjarak $h/2$ dari tumpuan berada lebih dekat ke ujung komponen dari pada panjang transfer tendon prategang, maka dalam perhitungan V_{cw} untuk kondisi retak akibat geser badan digunakan nilai prategang yang direduksi. Gaya prategang dapat dianggap

bervariasi dari nol pada ujung tendon sampai harga maksimum sebesar 50 kali diameter (kawat untai) atau 100 kali diameter (kawat tunggal) pada titik sejarak panjang transfer tendon.

3.3.3 Kekuatan Geser Batas Yang Disumbangkan oleh Tulangan Geser

Sumbangan tulangan geser tegak dan miring terhadap kekuatan geser batas, V_s , ditentukan dengan persamaan berikut :

- a). untuk tulangan geser tegak lurus

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

- b). untuk tulangan geser miring

$$V_s = \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{s}$$

di mana α menyatakan besarnya sudut antara sengkang miring dan sumbu longitudinal komponen struktur, dan d adalah jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik longitudinal, tapi tidak perlu diambil kurang dari $0,8h$.

Dalam segala hal V_s tidak boleh melebihi $(2\sqrt{f_c}/3) b_v d$.

3.3.4 Kekuatan Geser Batas Rencana

Kekuatan geser rencana harus diambil sebesar ϕV_n , di mana kuat geser batas V_n , dan ϕ adalah faktor reduksi kekuatan.

Untuk memenuhi syarat keamanan geser, kuat geser rencana harus diambil tidak lebih kecil dari gaya geser batas (ultimit, atau gaya geser rencana terfaktor) V_u pada penampang yang ditinjau akibat kombinasi pembebanan luar yang paling berbahaya.

$$\phi V_n \geq V_u$$

3.3.5 Gaya Geser Maksimum Di Dekat Tumpuan

Gaya geser batas atau gaya geser rencana terfaktor V_u dihitung dengan menggunakan beban rencana batas seperti yang ditentukan pada Peraturan Pembebanan untuk Jembatan.

Gaya geser maksimum di dekat tumpuan harus diambil sebagai gaya geser pada:

- a). jarak $h/2$ dari muka tumpuan, jika tidak ada beban terpusat bekerja antara muka tumpuan dan lokasi sejauh jarak tersebut, atau
- b). muka tumpuan, jika retak diagonal akibat geser mungkin terjadi pada tumpuan atau berlanjut sampai pada tumpuan.

3.3.6 Tulangan geser minimum

Luas tulangan geser minimum adalah:

$$A_v = \left(\frac{b_v s}{3 f_y} \right)$$

Bila gaya prategang efektif tidak kurang dari 40% kekuatan tarik tulangan, tulangan geser minimum dapat dihitung dengan persamaan di atas atau persamaan berikut:

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_v}}$$

3.3.7 Persyaratan tulangan geser

Persyaratan untuk tulangan geser berikut ini harus diterapkan dalam perencanaan geser:

Jika gaya geser rencana terfaktor V_u tidak melebihi kekuatan geser rencana balok dengan tulangan geser minimum, $V_u \leq \phi V_{n,min}$, maka hanya perlu dipasang tulangan geser minimum.

Syarat pemasangan tulangan geser minimum ini pada balok bisa diabaikan jika $V_u \leq \phi V_c$ dan tinggi total komponen struktur tidak melebihi nilai terbesar dari 250 mm dan setengah lebar badan.

Ketentuan mengenai tulangan geser minimum ini dapat diabaikan bila menurut pengujian yang mensimulasikan pengaruh perbedaan penurunan, susut, rangkai dan

perubahan suhu yang mungkin terjadi selama masa layan, komponen dapat mengembangkan kuat lentur dan geser nominal yang diperlukan.

Jika $V_u > \phi V_{n,min}$, maka harus dipasang tulangan geser dengan kuat geser batas V_s .

Jika gaya prategang lebih besar dari gaya geser rencana, $V_p > V_u$, maka gaya geser rencana semula harus dimodifikasi menjadi $V_u = 1,2 V_p - V_{u,awal}$ dan untuk perhitungan selanjutnya V_p dianggap nol.

Contoh 3.2-1 Merencanakan kapasitas geser balok T pada contoh 3.1.

Bentang $L = 36 \text{ m}$

Penampang

Tinggi penampang $h = 1.829 \text{ m}$

Lebar badan $b_w = 0.203 \text{ m}$

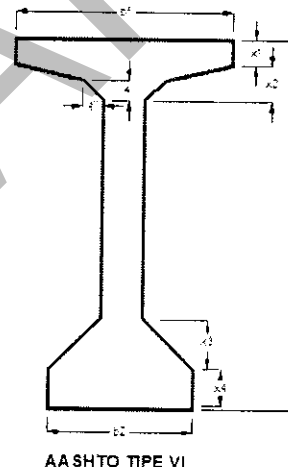
$A_c = 7 \times 10^5 \text{ mm}^2$

$Y_t = 904.732 \text{ mm}$

$S_b = 3.303 \times 10^8 \text{ mm}^3$

$P_e = 5512.147 \text{ kN}$ $A_{ps} = 5292 \text{ mm}^2$ $d_p = 1.849 \text{ m}$

$f_{pe} = \frac{P_e}{A_{ps}} = 1041.6 \text{ MPa} > 0.4f_{pu} = 744 \text{ MPa}$



layout kabel mengikuti persamaan parabolik sebagai berikut:

$$e_x(x) = \alpha_1 \cdot x^2 + \beta_1 \cdot x + \gamma_1$$

$$\alpha_1 = -0.0022 \text{ m}^{-1} \quad \beta_1 = 0.0805 \quad \gamma_1 = 0 \text{ m}$$

$$\text{check } e_x(0.5L) = 0.724 \text{ m} = e_m$$

Material

Faktor reduksi $\phi = 0.75$

Kuat tekan beton $f_c = 45.65 \text{ Mpa}$

Tegangan leleh tul. $f_y = 400 \text{ Mpa}$

Beban

$$Q_{gir} = 17.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad Q_{sdl} = 16.226 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad Q_{II} = 8.755 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{uDL} = 1.3 \cdot Q_{gir} \quad Q_{uDL} = 22.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{uSDL} = 1.3 \cdot Q_{sdl} \quad Q_{uSDL} = 21.094 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_{uLL} = 2.2 \cdot Q_{II} \quad Q_{uLL} = 19.261 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$Q_u = Q_{uDL} + Q_{uSDL} + Q_{uLL} \quad Q_u = 63.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\Delta Q_u = Q_{uSDL} + Q_{uLL} \quad \Delta Q_u = 40.355 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Gaya-gaya dalam :

Saat beban layan belum bekerja (geser hanya ditahan oleh girder saja)

beban konstruksi yang bekerja = 1 kN/m²

$$M_{uDL}(x) = Q_{uDL} \cdot \left[\frac{L}{2} \cdot x - \frac{(x)^2}{2} \right] \quad V_{uDL}(x) = Q_{uDL} \cdot \left[\frac{L}{2} - (x) \right]$$

$$M_u(x) = Q_u \cdot \left[\frac{L}{2} \cdot x - \frac{x^2}{2} \right] \quad V_u(x) = Q_u \cdot \left[\frac{L}{2} - (x) \right]$$

$$\Delta M_u(x) = \Delta Q_u \cdot \left[\frac{L}{2} \cdot x - \frac{(x)^2}{2} \right] \quad \Delta V_u(x) = \Delta Q_u \cdot \left[\frac{L}{2} - (x) \right]$$

Diagram momen

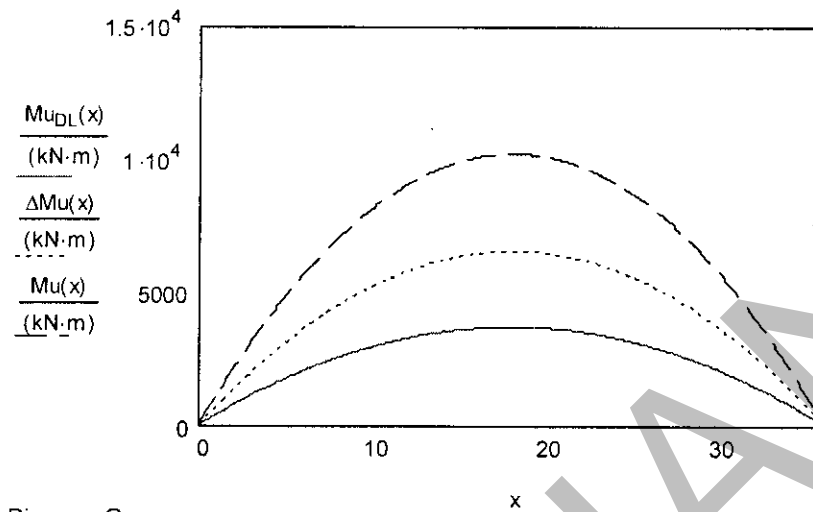
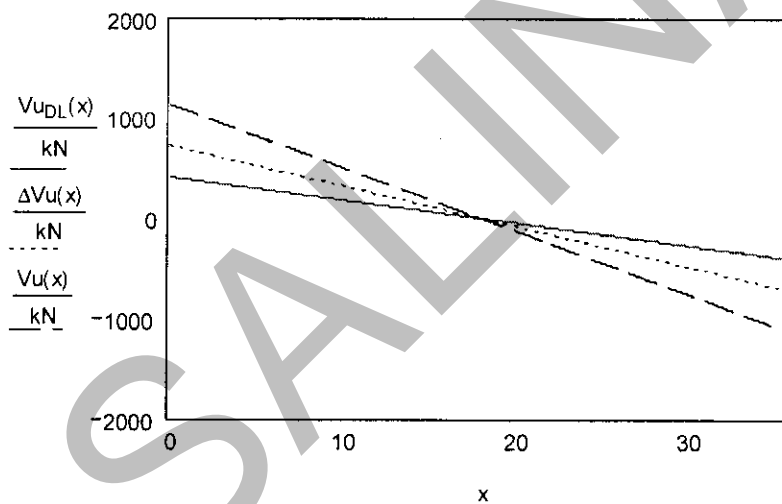


Diagram Geser



$$x_1 = \frac{h}{2} \quad x_2 = 0.25L \quad x_3 = 0.35L$$

$$x_2 = 9 \text{ m} \quad x_3 = 12.6 \text{ m}$$

Momen

$$Mu_1 = Mu(x_1) \quad Mu_1 = 1012.272 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Mu_2 = Mu(x_2) \quad Mu_2 = 7667.228 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Mu_3 = Mu(x_3) \quad Mu_3 = 9302.903 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Geser

$$Vu_1 = Vu(x_1) \quad Vu_1 = 1078.183 \text{ kN}$$

$$Vu_2 = Vu(x_2) \quad Vu_2 = 567.943 \text{ kN}$$

$$Vu_3 = Vu(x_3) \quad Vu_3 = 340.766 \text{ kN}$$

Jarak serat atas ke pusat prategang, dp

$$dp_1 = Y_t + e_x(x_1) \quad dp_1 = 0.976 \text{ m}$$

$$dp_2 = Y_t + e_x(x_2) \quad dp_2 = 1.448 \text{ m}$$

$$dp_3 = Y_t + e_x(x_3) \quad dp_3 = 1.564 \text{ m}$$

Persyaratan Geser menurut ACI :

$$0.4 \cdot f_{pu} = 744 \text{ Mpa} < f_{pe} = 1041.6 \text{ Mpa}$$

dapat menggunakan metoda sederhana sebagai berikut :

$$V_c = \frac{1}{20} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{\text{MPa}}} + 4.8 \cdot \frac{Vu \cdot dp}{Mu}$$

$$\frac{Vu \cdot dp}{Mu} \leq 1 \quad \frac{Vu_1 \cdot dp_1}{Mu_1} = 1.04$$

$$\frac{Vu_2 \cdot dp_2}{Mu_2} = 0.107$$

$$\frac{Vu_3 \cdot dp_3}{Mu_3} = 0.057$$

$$vc1 = \left(\frac{1}{20} \cdot \sqrt{\frac{fc}{\text{Mpa}}} + 4.8 \cdot 1.0 \right) \cdot \text{Mpa} \quad vc1 = 5.138 \text{ MPa}$$

$$vc2 = \left(\frac{1}{20} \cdot \sqrt{\frac{fc}{\text{Mpa}}} + 4.8 \cdot 0.107 \right) \cdot \text{Mpa} \quad vc2 = 0.851 \text{ MPa}$$

$$vc3 = \left(\frac{1}{20} \cdot \sqrt{\frac{fc}{\text{Mpa}}} + 4.8 \cdot 0.057 \right) \cdot \text{Mpa} \quad vc3 = 0.611 \text{ MPa}$$

$\lambda = 1$ (untuk beton normal)

$$vc1 = \begin{cases} 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc1 > 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc1 \leq \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ vc1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad vc1 = 2.703 \text{ Mpa}$$

$$vc2 = \begin{cases} 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc2 > 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc2 \leq \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ vc2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad vc2 = 1.126 \text{ Mpa}$$

$$vc3 = \begin{cases} 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc3 > 0.4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} & \text{if } vc3 \leq \frac{\lambda}{6} \cdot \sqrt{fc \cdot (\text{Mpa})} \\ vc3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad vc3 = 1.126 \text{ Mpa}$$

Saat beban layan bekerja

Pada titik 1: $x_1 = 0.914 \text{ m}$

$V_{u1} = 1078.183 \text{ kN} > \phi \cdot v_{c1} \cdot b_w \cdot d_{p1} = 402.167 \text{ kN}$
 maka diperlukan tulangan geser tidak minimum

Menentukan spasi, s $s_{act} = 200 \text{ mm}$ (praktis)

$$s_w = \min \left(\begin{pmatrix} 0.75 \cdot h \\ 600 \text{ mm} \\ s_{act} \end{pmatrix} \right) \quad s = 200 \text{ mm}$$

Luas tul. minimum $A_{vmin} = \frac{b_w \cdot s}{3 \cdot f_y} \cdot Mpa \quad A_{vmin} = 33.867 \text{ mm}^2$

Menentukan luas tulangan geser, A_v

$$A_{v1} = \left(\frac{V_{u1}}{\phi} - v_{c1} \cdot b_w \cdot d_{p1} \right) \cdot \frac{s}{f_y \cdot d} \quad A_{v1} = 226.722 \text{ mm}^2$$

Luas tul. geser $\text{dia} = 13 \cdot \text{mm}$

$$A_{v1_{act}} = 0.25 \cdot \pi \cdot \text{dia}^2 \cdot 2 \quad A_{v1_{act}} = 265.465 \text{ mm}^2 > A_{vmin} \text{ atau } A_{v1} \dots \text{OK!}$$

$$\phi V_{n1} = \phi \cdot \left(v_{c1} \cdot b_w \cdot d_{p1} + \frac{A_{v1_{act}} \cdot f_y \cdot d}{s} \right) \quad \phi V_{n1} = 1193.702 \text{ kN}$$

Pada titik 2: $x_2 = 9 \text{ m}$

$$V_{u2} = 567.943 \text{ kN} > \phi \cdot v_{c2} \cdot b_w \cdot d_{p2} = 248.461 \text{ kN}$$

maka diperlukan tulangan geser tidak minimum

Menentukan spasi, s $s_{act} = 250 \text{ mm}$ (praktis)

$$s = \min \left(\begin{pmatrix} 0.75 \cdot h \\ 600 \text{ mm} \\ s_{act} \end{pmatrix} \right) \quad s = 250 \text{ mm}$$

$$\text{Luas tul. minimum} \quad A_{vmin} = \frac{b_w \cdot s}{3 \cdot f_y} \cdot M_{pa} \quad A_{vmin} = 42.333 \text{ mm}^2$$

Menentukan luas tulangan geser, A_v

$$A_{v2} = \left(\frac{V_{u2}}{\phi} - v_{c2} \cdot b_w \cdot d_{p2} \right) \cdot \frac{s}{f_y \cdot d} \quad A_{v2} = 133.935 \text{ mm}^2$$

$$\phi Vn_2 = \phi \cdot \left(vc_2 \cdot bw \cdot dp_2 + \frac{Av_{2act} \cdot fy \cdot d}{s} \right) \quad \phi Vn_2 = 881.689 \text{ kN}$$

Pada titik 3: $x_3 = 12.6 \text{ m}$

$$Vu_3 = 340.766 \text{ kN} > \phi \cdot 0.5vc_3 \cdot bw \cdot dp_3 = 134.171 \text{ kN}$$

maka diperlukan tulangan geser tidak minimum

Menentukan spasi, s $s_{act} = 300 \text{ mm}$ (praktis)

$$s = \min \left(\begin{pmatrix} 0.75 \cdot h \\ 600 \text{ mm} \\ s_{act} \end{pmatrix} \right) \quad s = 300 \text{ mm}$$

Luas tul. minimum $Av_{min} = \frac{bw \cdot s}{3 \cdot fy} \cdot Mpa \quad Av_{min} = 50.8 \text{ mm}^2$

Menentukan luas tulangan geser, Av

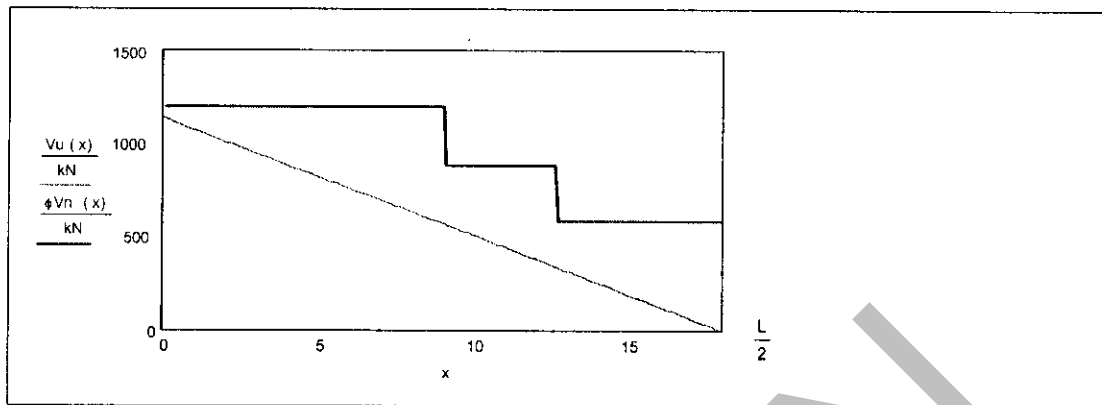
$$Av_3 = \left(\frac{Vu_3}{\phi} - vc_3 \cdot bw \cdot dp_3 \right) \cdot \frac{s}{fy \cdot d} \quad Av_2 = 133.935 \text{ mm}^2$$

Luas tul. geser $dia = 10 \cdot \text{mm}$

$$Av_{3act} = 0.25 \cdot \pi \cdot dia^2 \cdot 2 \quad Av_{3act} = 157.08 \text{ mm}^2 \quad > Av_{min} \text{ atau } Av_2 \cdot \text{OK!}$$

$$\phi Vn_3 = \phi \cdot \left(vc_3 \cdot bw \cdot dp_3 + \frac{Av_{3act} \cdot fy \cdot d}{s} \right) \quad \phi Vn_3 = 580.585 \text{ kN}$$

$$\phi Vn(x) = \begin{cases} \phi Vn_1 & \text{if } 0 \text{ m} < x \leq x_2 \\ \phi Vn_2 & \text{if } x_2 < x \leq x_3 \\ \phi Vn_3 & \text{if } x > x_3 \end{cases}$$



3.4 Daerah pengangkuran untuk angkur prategang

3.4.1 Angkur untuk komponen prategang pasca tarik

Tulangan harus dipasang untuk memikul gaya tarik yang timbul dari aksi dan penyebaran gaya prategang pada daerah angkur.

Pada daerah pengangkuran harus dipasang tulangan untuk menahan gaya pemecah (bursting), gaya pembelah (splitting), dan gaya pengelupas (spalling) akibat pengangkuran tendon, kecuali apabila dapat dibuktikan bahwa hal itu memang tidak diperlukan.

Daerah dengan perubahan penampang mendadak harus diberi tulangan yang cukup. Angkur, penyambung dan penutup akhir (end fitting) harus dilindungi secara permanen terhadap karat.

3.4.2 Pembebanan yang diperhitungkan

Pembebanan yang harus diperhitungkan meliputi:

- a). semua beban pada angkur;
- b). beban kritis selama pelaksanaan penarikan.

Bila jarak antara 2 angkur kurang dari 0,3 kali tinggi atau lebar total komponen, harus dipertimbangkan pengaruh pasangan angkur yang bekerja sebagai angkur tunggal ekuivalen di bawah gaya prategang total.

Dalam menghitung pengaruh rencana harus digunakan nilai maksimum gaya prategang selama transfer.

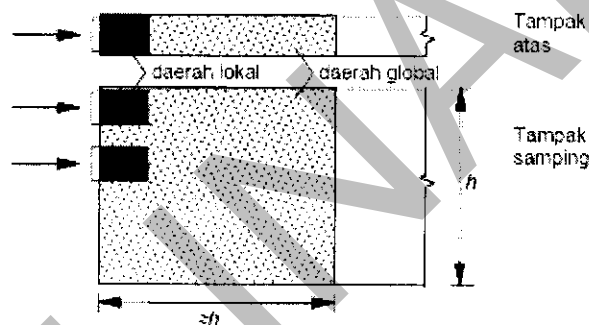
Jika angkur majemuk ditegangkan secara berurutan, gaya prategang total pada tiap tahapan dapat dikurangi untuk mengantisipasi kehilangan pada tendon yang sudah ditegangkan.

3.4.3 Perhitungan gaya tarik sepanjang garis kerja gaya angkur

Resultan gaya pecah dari tegangan tarik melintang yang terjadi sepanjang garis aksi gaya angkur besarnya tergantung pada gaya maksimum yang terjadi pada angkur saat penegangan, dan perbandingan tinggi atau lebar pelat tumpuan angkur dengan tinggi atau lebar prisma simetris.

Tinggi atau lebar prisma harus diambil yang terkecil dari:

- c). 2 kali jarak dari pusat angkur ke permukaan beton terdekat pada bidang penampang memanjang.
- d). Jarak dari pusat angkur ke pusat angkur sekitarnya yang terdekat.



Gambar 3.3-1 Daerah Angkur Lokal dan Global

3.4.4 Jumlah dan distribusi tulangan

Untuk gaya pemecah (bursting) di mana tulangan tidak di dekat permukaan beton dan ada tambahan tulangan permukaan, tegangan pada tulangan harus dibatasi maksimum 200 MPa.

Untuk gaya pengelupas (spalling) di mana terdapat lapisan tulangan pada tiap sisi komponen, tegangan pada tulangan permukaan harus dibatasi sampai 150 MPa untuk mengontrol retak. Tulangan harus diangkur dengan baik untuk menyalurkan tegangan tersebut.

Tulangan harus didistribusikan sebagai berikut:

Tulangan untuk gaya pemecah harus didistribusikan dari $0,1h$ sampai $1,0h$ dari permukaan yang dibebani.

- a). Tulangan yang serupa harus dipasang dari bidang pada $0,1h$ sampai sedekat mungkin ke muka yang dibebani. h harus diambil sama dengan tinggi atau lebar dari prisma simetris. Tulangan yang dipasang untuk mencegah pemecahan juga dapat digunakan untuk mencegah pengelupasan asalkan posisinya tepat dan dijangkarkan dengan baik.
- b). Tulangan untuk gaya pengelupas harus dipasang sedekat mungkin ke muka yang dibebani dan konsisten dengan persyaratan selimut beton dan pemadatan.
- c). Pada tiap bidang yang sejajar dengan sisi yang dibebani, tulangan harus ditentukan dari penampang memanjang dengan persyaratan tulangan yang terbesar pada bidang tersebut, dan harus diperpanjang ke seluruh tinggi atau lebar daerah ujung.

3.4.5 Angkur Untuk Komponen Prategang Pratarik

Pada daerah pengangkuran komponen pra-tarik, tulangan untuk gaya pemecah umumnya tidak diperlukan.

Untuk mengontrol retak horisontal, sengkang vertikal yang dipasang harus menahan minimum 4% gaya prategang total saat transfer. Untuk mengontrol retak vertikal diperlukan sengkang horisontal dalam luas yang sama, dan dipasang bersama-sama sengkang vertikal jika diperlukan kontrol terhadap retak vertikal dan horisontal. Sengkang ini ditempatkan sebagai tulangan pencegah pengelupasan (spalling reinforcement) di sepanjang 0,25 kali tinggi (lebar) komponen dari muka ujung. Tulangan harus direncanakan untuk menyalurkan tegangan sebesar 150 MPa.

3.4.6 Detail penulangan khusus pada daerah pengangkuran

Harus diperhatikan tulangan yang diperlukan pada daerah tegangan tarik setempat seperti pada sudut tak bertegangan (dead end), angkur internal, dan angkur luar.

Pada angkur internal, tulangan khusus harus dipasang untuk menahan 20-40% gaya prategang dalam tendon.

Bila digunakan angkur luar, selain tulangan untuk menahan gaya pemecah, diperlukan tulangan tambahan untuk menahan tarik akibat kelengkungan tendon, menyediakan sambungan geser ke komponen utama dan melayani penyebaran gaya prategang, serta menahan tarik akibat eksentrisitas setempat dari gaya prategang.

3.4.7 Panjang penyaluran untuk tendon pratarik

Jika tidak ada data pengujian yang cermat, panjang penyaluran L_p untuk pelepasan berangsur diambil minimum sebagai berikut:

- 150 kali diameter untuk kawat baja (wire)
- 60 kali diameter untuk kawat untai (strand).
- $(f_{ps} - \frac{2}{3} f_{se}) d_b / 7$ mm

Bila lekatan kawat untai tidak menerus sampai ke ujung komponen, dan bila akibat beban kerja terdapat kondisi tarik pada beton yang awalnya mengalami tekan, maka nilai panjang penyaluran di atas harus dikali 2.

3.4.8 Penyaluran tegangan tendon pasca tarik dengan pengankuran

Pengankuran tendon harus mampu menyalurkan kekuatan tarik f_{pu} ke dalam tendon.

Angkur untuk tendon yang tidak terlekat harus mampu menahan kondisi pembebanan berulang.

4 KEHILANGAN PRATEGANG

4.1 Umum

Secara umum kehilangan prategang dapat disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. Friksi (pasca-tarik saja)
2. Slip pengankuran (*Anchorage-seating*)
3. Perpendekan elastik beton (*Elastic-shortening*)
4. Rangkak
5. Susut
6. Relaxation

Adapun penjelasan semua jenis kehilangan prategang ini dapat dijelaskan pada sub bab selanjutnya.

4.2 Kehilangan Akibat Friksi

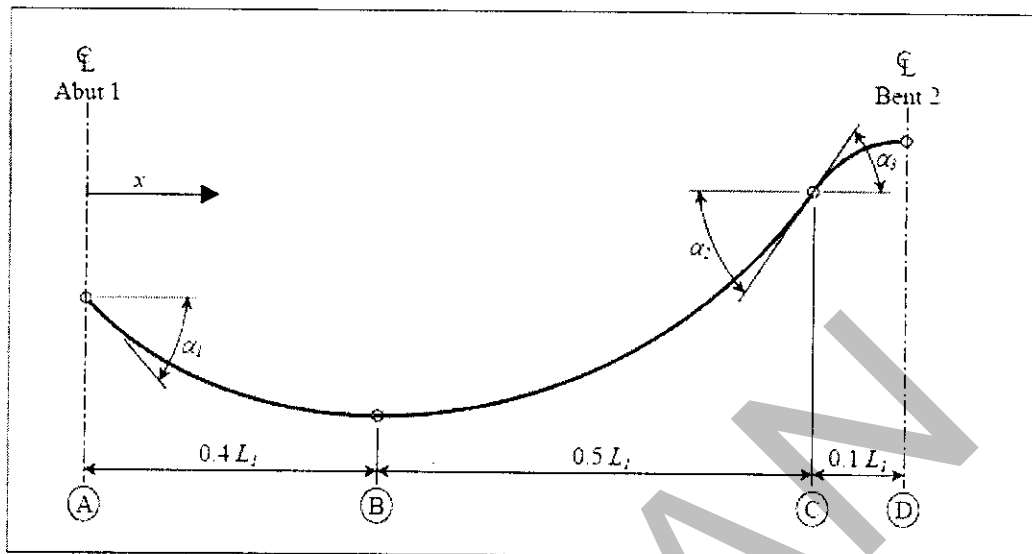
Kehilangan tegangan akibat friksi antara tendon dan selongsong beton sekitarnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f_0 = f_x e^{(\mu\alpha + KL)}$$

(CL. 5.9.5.2.2 AASHTO-2004)

Dimana :

- f_0 = tegangan baja prategang pada saat *jacking* sebelum *seating*.
 f_x = tegangan baja prategang di titik x sepanjang tendon.
 e = nilai dasar logaritmik natural *naverian*
 μ = koefisien friksi, bila tidak disebutkan dalam spesifikasi material nilainya dapat dilihat pada Tabel 2-1 Koefisien Friksi
 α = perubahan sudut total dari profil layout kabel dalam radian dari titik *jacking*
 K = koefisien wobble, bila tidak disebutkan dalam spesifikasi material nilainya dapat dilihat Tabel 2-1 Koefisien Friksi
 L = Panjang baja prategang diukur dari titik *jacking*.

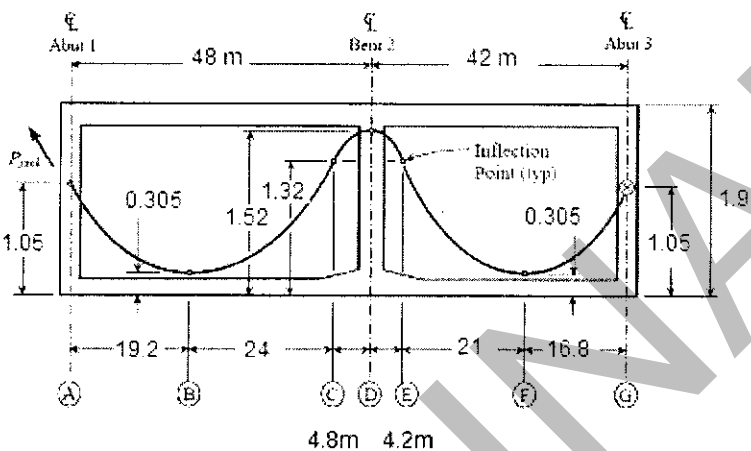


Gambar 4-1 Contoh Model Layout Tendon

Tabel 4-1 Koefisien Friksi untuk tendon pasca-tarik (CL. 5.9.5.2.2 AASHTO-2004)

Type of Steel	Type of Duct	K	m
Wire or strand	Rigid and semirigid galvanized metal sheathing	$6,6 \times 10^{-7}$	0,15-0,25
	Polyethylene	$6,6 \times 10^{-7}$	0,23
	Rigid steel pipe deviators for external tendons	$6,6 \times 10^{-7}$	0,25
High strength bars	Galvanized metal sheathing	$6,6 \times 10^{-7}$	0,30

Contoh Perhitungan:

<p>CONTOH 4.1</p>	<p>Kehilangan Akibat Friksi</p>	<p>1</p>
<p>SOAL : Jembatan dua bentang box-girder yang ditarik di satu sisi.</p>		
		
<p>DIBERIKAN :</p> <p>Jumlah titik Analisis $np = 7$</p> <p>Jumlah bentang $nb = 2$</p> <p>Panjang Bentang $Sb_0 = 48m$ $Sb_1 = 42m$ (bentang pertama) (bentang kedua)</p>		

Material Kabel Prategang Jenis prategang Post = "Ya" (Post-tension) Jenis baja Low_relax = "Ya" Tegangan putus $f_{pu} = 1860 \text{ Mpa}$ Tegangan saat jack $f_{pj} = 0.75 \cdot f_{pu}$ $f_{pj} = 1.395 \times 10^3 \text{ Mpa}$ (maks.) Tegangan leleh $f_{py} = 0.85 \cdot f_{pu}$ $f_{py} = 1581 \text{ Mpa}$ Modulus elastisitas $E_{ps} = 195000 \text{ Mpa}$		
Koefisien friksi $\mu = 0.15$ (panjang frame < 180 m) Koefisien wobble $K = 0.00066 \cdot \frac{1}{m}$ Layout kabel $L_{x_0} = 0$ $y_{p_0} = 1.05$ $L_{x_1} = 19.2$ $y_{p_1} = 0.305$ $L_{x_2} = 43.2$ $y_{p_2} = 1.32$ $L_{x_3} = 48$ $y_{p_3} = 1.52$ $L_{x_4} = 52.2$ $y_{p_4} = 1.32$ $L_{x_5} = 73.2$ $y_{p_5} = 0.305$ $L_{x_6} = 90$ $y_{p_6} = 1.05$		L_x = jarak dari ujung penarikan kabel terhadap titik yang ditinjau. y_p = elevasi kabel terhadap serat terbawah penampang.
Langkah 1: Menentukan beda tinggi y dan beda jarak L Array spasi $i = 0..(np - 2)$ {bilangan 0,1,...,s/d 5} $y_i = y_{p_{i+1}} - y_{p_i} $ $L_i = L_{x_{i+1}} - L_{x_i}$		

Langkah 2: Menghitung perbedaan sudut vertikal (radian)

$\alpha =$

Segmen	y (m)	L (m)	$\alpha = 2(y/L)$
AB	0.745	19.200	0.078
BC	1.015	24.000	0.085
CD	0.200	4.800	0.083
DE	0.200	4.200	0.095
EF	1.015	21.000	0.097
FG	0.745	16.800	0.089

(y L)

Langkah 3: Menghitung rasio tegangan setelah friksi terhadap $f_o (= f_p)$

Segmen	μ	$\alpha = 2(y/L)$	$\Sigma\alpha$	Wobble, K	L	ΣL	$\mu\Sigma\alpha + K\Sigma L$	$e^{-(\mu\Sigma\alpha + K\Sigma L)}$
AB	0.150	0.078	0.078	0.00066	19.20	19.200	0.024	0.976
BC	0.150	0.085	0.162	0.00066	24.00	43.200	0.053	0.949
CD	0.150	0.083	0.246	0.00066	4.80	48.000	0.069	0.934
DE	0.150	0.095	0.341	0.00066	4.20	52.200	0.086	0.918
EF	0.150	0.097	0.437	0.00066	21.00	73.200	0.114	0.892
FG	0.150	0.089	0.526	0.00066	16.80	90.000	0.138	0.871

Langkah 4: Menghitung kehilangan tegangan akibat friksi

$$\Delta f_f = f_o - f_x = f_o \left[1 - e^{-(\mu\Sigma\alpha + K\Sigma L)} \right] \quad (\text{Rumus})$$

$$\Delta f_f = f_o (1 - R_f)$$

$$j = 0 \dots (np - 1) \quad \{\text{bilangan } 0, 1, \dots, s/d 6\}$$

$$\Delta f_{f_j} = \begin{cases} 0 & \text{if } j = 0 \\ f_{pj} (1 - R_{f_{j-1}}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

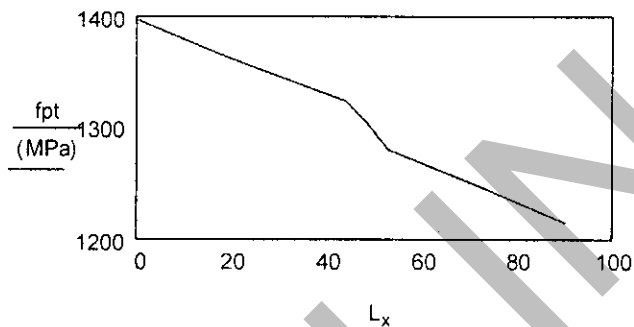
$$\Delta f_f = \begin{pmatrix} 0 \\ 33.507 \\ 71.798 \\ 92.369 \\ 114.4 \\ 150.208 \\ 180.203 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

Langkah 5: Tegangan prategang subtotal setelah friksi

$$f_{ptj} = f_{pj} - \Delta f_f$$

j	$f_{pt_{asal}}$ MPa	Δf_f MPa	f_{pt} MPa
0	1395.000	0.000	1395.000
1	1395.000	33.507	1361.493
2	1395.000	71.798	1323.202
3	1395.000	92.369	1302.631
4	1395.000	114.400	1280.600
5	1395.000	150.208	1244.792
6	1395.000	180.203	1214.797

$$\left[\begin{array}{c} f_{pj} \\ \text{(MPa)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \Delta f_f \\ \text{(MPa)} \end{array} \right]$$



4.3 Kehilangan Akibat Slip Pengangkuran

Kehilangan prategang yang disebabkan oleh slipnya baji-baji pada angkur saat gaya jacking ditransfer pada angkur. Besarnya slip angkur tergantung pada angkur saat gaya *jacking* ditransfer pada angkur. Besarnya slip angkur tergantung pada sistem prategang yang digunakan, nilainya bervariasi antara 3 – 10 mm. Nilai slip angkur 6 mm dapat diasumsikan dalam perhitungan untuk pendekatan (CL. 5.9.5.2.1 AASHTO-2004).

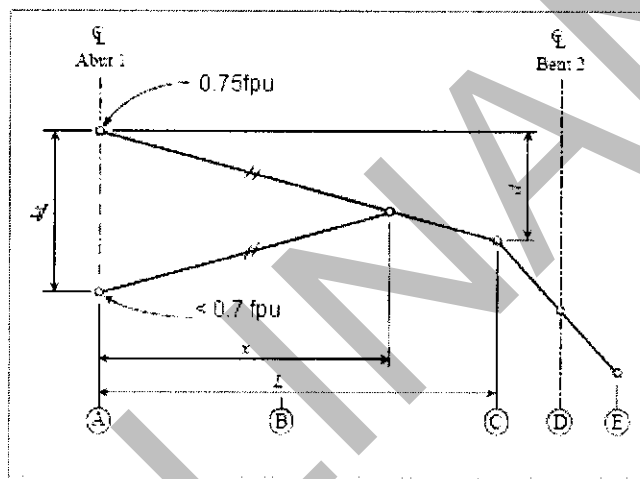
Kehilangan prategang yang terjadi akibat slip angkur dapat ditentukan dengan pendekatan rumus sebagai berikut :

$$\Delta f_A = \frac{2 \cdot d \cdot x}{L}$$

$$x = \sqrt{\frac{E \cdot (\Delta L) \cdot L}{d}}$$

Dimana

- Δf_A = kehilangan prategang akibat slip ankur
 d = kehilangan akibat friksi pada jarak L dari titik penarikan.
 x = panjang yang terpengaruh oleh slip ankur
 L = jarak antara titik penarikan(jacking) dengan titik dimana kehilangan diketahui
 ΔL = slip ankur , normalnya 6 mm s/d 9mm.



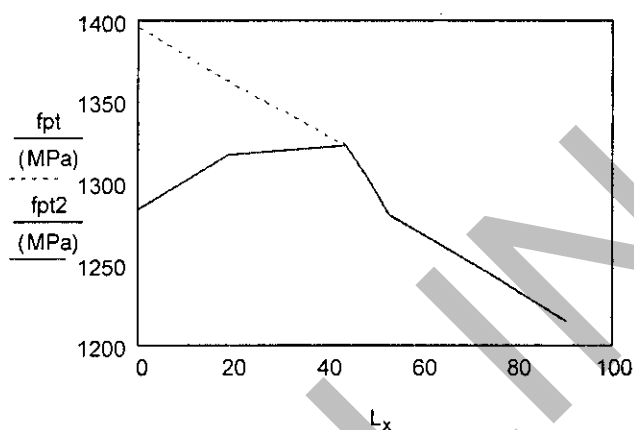
Gambar 4-2 Slip Angkur

CONTOH 4.2	Kehilangan Akibat Slip Angkur	2
SOAL : Hitung kehilangan akibat slip ankur pada contoh 2.1.		
Diberikan :		
Modulus elastisitas kabel	Eps = 195000MPa	
Besarnya selip pada ankur	$\Delta L = 0.0095 \text{ m}$	
Jarak ke titik yang diketahui	$L = L_0 + L_1 \quad L = 43.2 \text{ m}$	
Kehilangan akibat friksi sejarak L	$d = \Delta f_2$	$d = 71.798 \text{ MPa}$

<p>Langkah 1: Jarak yang terpengaruh oleh slip angkur, x</p> $x = \sqrt{\frac{E_{ps} \cdot \Delta L \cdot L}{d}} \quad x = 33.386 \text{ m}$	
<p>Langkah 2: Kehilangan tegangan akibat <i>anchor set</i></p> $\Delta f_a = \frac{2 \cdot d \cdot x}{L} \quad \Delta f_a = 110.975 \text{ MPa}$	
<p>Langkah 3: Check tegangan pada posisi angkur setelah slip (tegangan harus kurang dari $0.7f_{pu}$)</p> $f_p = f_{pj} - \Delta f_a$ $f_p = 1284.025 \text{ MPa} < 0.7f_{pu} = 1.302 \times 10^3 \text{ MPa} \quad \text{OK!}$	
<p>Langkah 4: Tegangan prategang setelah slip angkur</p> <p>Tegangan di ujung $f_{puj} = f_{pj} - \Delta f_a$</p> $f_{puj} = 1.284 \times 10^3 \text{ MPa}$ $f_{pt2j} = \begin{cases} f_{puj} & \text{if } j = 0 \\ \min(f_{ptj}, f_{puj} + \Delta f_{fj}) & \text{otherwise} \end{cases}$ <p>Redefinisi kehilangan akibat slip angkur</p> $\Delta f_a = f_{pt} - f_{pt2}$	

j	$f_{pt_{asal}}$ MPa	Δf_a MPa	f_{pt} MPa
0	1395.000	110.975	1284.025
1	1361.493	43.961	1317.532
2	1323.202	0.000	1323.202
3	1302.631	0.000	1302.631
4	1280.600	0.000	1280.600
5	1244.792	0.000	1244.792
6	1214.797	0.000	1214.797

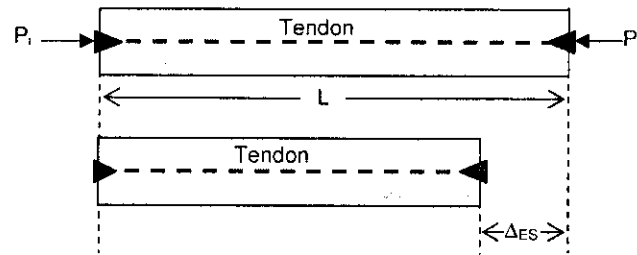
$$\left[\begin{array}{c} f_{pt} \\ \text{(MPa)} \end{array} \quad \begin{array}{c} \Delta f_a \\ \text{(MPa)} \end{array} \right]$$



4.4 Kehilangan Akibat Pemendekan Beton

Beton menjadi lebih pendek bila gaya prategang diaplikasikan. Bersamaan dengan pemendekan itu tendon yang tertanam dalam beton tersebut kehilangan sebagian gaya yang dibawanya.

Untuk beton prategang pasca-tarik kehilangan akibat pemendekan beton tidak ada bila beton ditarik bersamaan. Bila tidak bersamaan kehilangan prategang pada pasca-tarik besarnya $\frac{1}{2}$ kali nilai pra-tarik.



Gambar 4-3 Pemendekan Beton

Gambar 4-3 mengilustrasikan pemendekan beton yang disebabkan bekerjanya gaya prategang initial P_i . Regangan yang terjadi adalah

$$\varepsilon_{ES} = \frac{\Delta ES}{L} = \frac{f_c}{E_c} = \frac{P_i}{A_c E_c}$$

Kehilangan tegangan akibat pemendekan beton dapat dihitung sebagai berikut:

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

Dimana

f_{cs} = tegangan dalam beton pada level pusat tendon prategang.

n = nilai modular atau rasio E_s/E_c .

Jika layout tendon mempunyai eksentrisitas terhadap pusat penampang dan berat sendiri beton ikut diperhitungkan maka :

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

Catatan:

f_{cs} bernilai (-) bila menyebabkan tekan dan bernilai (+) bila menyebabkan tarik.

CONTOH 4.3	Kehilangan Akibat Pemendekan Beton	3
SOAL : Hitung kehilangan akibat pemendekan beton pasca-tarik pada contoh 2.1.		
a. Jika 2 tendon sekaligus dalam sekali penarikan		
b. Jika 1 tendon dalam sekali penarikan		
c. Jika semua ditarik bersamaan		
Diberikan :		
Mutu beton silinder	$f_c = 60\text{MPa}$	
Modulus elastisitas beton (28hari)	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c \cdot \text{MPa}}$ $E_c = 3.641 \times 10^4 \text{ MPa}$	
Mutu beton saat transfer	$f_{ci} = 0.65 \cdot f_c$ $f_{ci} = 39\text{MPa}$	
Modulus elastisitas beton initial	$E_{ci} = 4700 \cdot \sqrt{f_{ci} \cdot \text{MPa}}$ $E_{ci} = 2.935 \times 10^4 \text{ MPa}$	
Luas penampang	$A_{c_j} = 6\text{m}^2$	
Momen inersia	$I_{c_j} = 3.764\text{m}^4$	
Garis berat bawah	$y_{b_j} = 1.05\text{m}$	
Radius girasi	$r = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}}$	
Berat isi beton	$\gamma_c = 24\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	
Jumlah tendon	$n_{td} = 4$	
Luas total kabel	$A_{ps} = 7200\text{mm}^2$	
Langkah 1 : Menentukan eksentrisitas kabel		
$e_{x_j} = y_{b_j} - y_{p_j} \cdot \text{m}$		

<table border="1"> <thead> <tr> <th>j</th><th>L_x m</th><th>e_x m</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>1</td><td>19.20</td><td>0.745</td></tr> <tr><td>2</td><td>43.20</td><td>-0.270</td></tr> <tr><td>3</td><td>48.00</td><td>-0.470</td></tr> <tr><td>4</td><td>52.20</td><td>-0.270</td></tr> <tr><td>5</td><td>73.20</td><td>0.745</td></tr> <tr><td>6</td><td>90.00</td><td>0.000</td></tr> </tbody> </table>	j	L_x m	e_x m	0	0.00	0.000	1	19.20	0.745	2	43.20	-0.270	3	48.00	-0.470	4	52.20	-0.270	5	73.20	0.745	6	90.00	0.000	<p>Catatan: tanda (+) dibawah cgc</p>	
j	L_x m	e_x m																								
0	0.00	0.000																								
1	19.20	0.745																								
2	43.20	-0.270																								
3	48.00	-0.470																								
4	52.20	-0.270																								
5	73.20	0.745																								
6	90.00	0.000																								
$\begin{pmatrix} L_x & e_x \\ m & m \end{pmatrix}$	<p>Langkah 2: Hitung Momen akibat berat sendiri</p>																									
$Q_d = 144 \text{ m}^{-1} \text{ kN}$	$M_D(x) = \frac{1}{2} \cdot Q_d \cdot L_b \cdot x - \frac{Q_d}{2} \cdot x^2$																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>j</th><th>L_j m</th><th>M_D kN m</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>1</td><td>19.20</td><td>39,813.12</td></tr> <tr><td>2</td><td>43.20</td><td>14,929.92</td></tr> <tr><td>3</td><td>48.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>4</td><td>52.20</td><td>11,430.72</td></tr> <tr><td>5</td><td>73.20</td><td>30,481.92</td></tr> <tr><td>6</td><td>90.00</td><td>0.00</td></tr> </tbody> </table>	j	L_j m	M_D kN m	0	0.00	0.00	1	19.20	39,813.12	2	43.20	14,929.92	3	48.00	0.00	4	52.20	11,430.72	5	73.20	30,481.92	6	90.00	0.00	<p>Langkah 3: Tegangan pada beton di level prategang</p>	
j	L_j m	M_D kN m																								
0	0.00	0.00																								
1	19.20	39,813.12																								
2	43.20	14,929.92																								
3	48.00	0.00																								
4	52.20	11,430.72																								
5	73.20	30,481.92																								
6	90.00	0.00																								
<p>Gaya prategang saat transfer (nawymembolehkan reduksi 10% , $P_i = 0.9P_j$)</p>	$P_i = f_{pj} \cdot A_{ps} \quad P_i = 10044 \text{ kN}$	$f_{cs} = \begin{pmatrix} 1.674 \\ -4.725 \\ 2.939 \\ 2.263 \\ 2.688 \\ -2.878 \\ 1.674 \end{pmatrix} \text{ MPa}$																								
$f_{cs_j} = \frac{P_i}{A_{c_j}} \cdot \left[1 + \frac{(e_x)^2}{(r_j)^2} \right] - \frac{M_{D_j} \cdot e_x}{I_{c_j}}$	<p>Catatan: untuk losses tegangan tekan yang menyebabkan losses)</p>																									

<p>Langkah 4: Kehilangan tegangan pada beton pra-tarik</p> $n = \frac{E_{ps}}{E_{ci}} \quad n = 6.644$ $\Delta f_{ES_pre} = n \cdot f_{cs} \quad (\text{kehilangan pemendekan total bila terjadi pada pra-tarik})$	
<p>Langkah 5: Kehilangan tegangan pada beton pasca-tarik</p> <p>Untuk pasca tarik yang ditarik tidak bersamaan, dengan kondisi penarikan sebagai berikut:</p> <p>a. Masing-masing penarikan per 2 tendon.</p> $ntj = 2$ <p>jumlah penarikan $n_j = \frac{ntd}{ntj} \quad n_j = 2$</p> $\Delta f_{ES_post} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \frac{i-1}{n_j-1}}{n_j} \cdot \Delta f_{ES_pre} \quad \Delta f_{ES_post} = \begin{pmatrix} 5.561 \\ -15.696 \\ 9.764 \\ 7.519 \\ 8.931 \\ -9.561 \\ 5.561 \end{pmatrix} \text{ MPa}$	
<p>b. Masing-masing penarikan per 1 tendon.</p> $ntj = 1$ <p>jumlah penarikan $n_j = \frac{ntd}{ntj} \quad n_j = 4$</p> $\Delta f_{ES_post} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \frac{i-1}{n_j-1}}{n_j} \cdot \Delta f_{ES_pre} \quad \Delta f_{ES_post} = \begin{pmatrix} 5.561 \\ -15.696 \\ 9.764 \\ 7.519 \\ 8.931 \\ -9.561 \\ 5.561 \end{pmatrix} \text{ MPa}$	

c. Penarikan semua tendon sekaligus

$$ntj = ntd \quad ntj = 4$$

$$\text{jumlah penarikan} \quad nj = \frac{ntd}{ntj} \quad nj = 1$$

$$\Delta f_{ES_post} = \frac{\sum_{i=1}^{nj} \frac{i-1}{nj-1}}{nj} \cdot \Delta f_{ES_pre} \quad \Delta f_{ES_post} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

Kehilangan akibat pemendekan

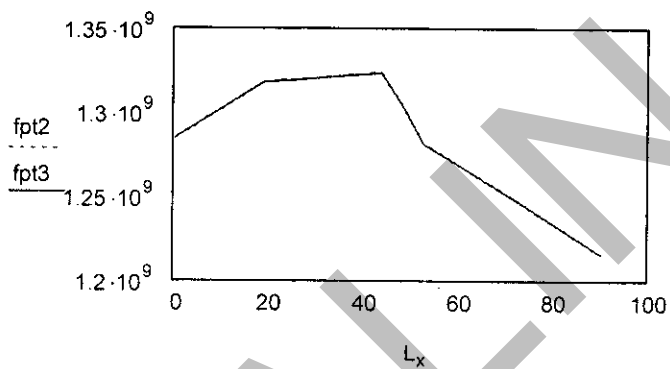
$$\Delta f_{ES} = \begin{cases} \Delta f_{ES_post} & \text{if Post = "Ya"} \\ \Delta f_{ES_pre} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Tegangan prategang setelah pemendekan

$$f_{pt3j} = f_{pt2j} - \Delta f_{ESj}$$

j	$f_{pt_{asal}}$ MPa	Δf_{ES} MPa	f_{pt} MPa
0	1284.025	0.000	1284.025
1	1317.532	0.000	1317.532
2	1323.202	0.000	1323.202
3	1302.631	0.000	1302.631
4	1280.600	0.000	1280.600
5	1244.792	0.000	1244.792
6	1214.797	0.000	1214.797

$$\left(\begin{array}{cc} f_{pt2} & \Delta f_{ES} \\ \text{MPa} & \text{MPa} \end{array} \right)$$



4.5 Kehilangan Akibat Susut Beton

Bila tidak terbenam dalam air terus menerus (kondisi kelembaban 100%), beton akan kehilangan kebasahannya (*moisture*) dan berkurang volumenya. Proses ini disebut sebagai penyusutan beton. Besarnya penyusutan beton dapat bervariasi dari nol (terbenam dalam air) sampai 0,0008 untuk penampang tipis yang terbuat dari agregat dengan penyusutan tinggi dan tidak dilakukan *curing* dengan baik.

Besarnya susut beton dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya:

- proporsi campuran
- jenis agregat
- rasio w/c
- jenis semen
- jenis dan waktu *curing*
- ukuran dan bentuk, atau rasio volume terhadap permukaan (V/S)
- kondisi lingkungan, kelembaban rata-rata di lokasi jembatan

Rumus umum kehilangan tegangan akibat susut berdasarkan PCI (*Prestressed Concrete Institute*) dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta f_{sh} = 8.2 \cdot 10^{-6} \cdot K_{sh} \cdot E_{ps} \cdot \left(1 - 0.006 \cdot \frac{V}{S}\right) \cdot (100 - R_h)$$

Dimana :

K_{sh} = konstanta yang bernilai 1 untuk pretension. Adapun untuk post-tension nilainya diberikan pada tabel dibawah ini.

E_{ps} = Modulus elastisitas baja prategang. [MPa]

R_h = kelembaban relatif. [%]

V/S = volume / luas permukaan. [inci]

Tabel 4-2 Tabel K_{sh} untuk pasca-tarik.

t (hari)	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{sh}	0.92	0.85	0.8	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45

Kehilangan akibat susut untuk kondisi standar bisa juga dihitung sebagai fungsi waktu dengan persamaan lainnya. Cara seperti ini dapat dilihat pada persamaan di bawah ini sebagai berikut:

a. Perawatan kondisi basah (*moist-curing*), setelah 7 hari

$$\Delta f_{sh} = \left(\frac{t}{35+t} \cdot 0.51 \cdot 10^{-3} \right) \cdot K_s \cdot K_h \cdot E_{ps}$$

b. Perawatan *steam-curing*, setelah 1 sampai dengan 3 hari.

$$\Delta f_{sh} = \left(\frac{t}{55+t} \cdot 0.56 \cdot 10^{-3} \right) \cdot K_s \cdot K_h \cdot E_{ps}$$

Dimana :

t = waktu (hari)

E_{ps} = Modulus elastisitas baja prategang. [MPa]

Δf_{sh} = Kehilangan akibat susut [MPa]

K_s = faktor ukuran, ditentukan dalam gambar 2-4, atau persamaan berikut

$$K_s(t) := \left[\frac{\frac{t}{26 \cdot e^{0.0142 \cdot \left(\frac{V}{S} \right) + t}}}{\frac{t}{45+t}} \right] \cdot \left(\frac{1064 - 3.70 \cdot \frac{V}{S}}{923} \right)$$

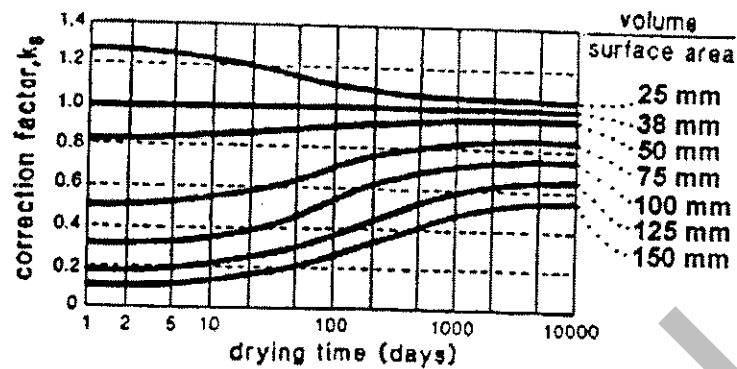
Catatan : V/S dalam [mm] dan t dalam [hari]

K_h = faktor kelembaban, ditentukan dalam tabel 2-4 atau persamaan berikut

$$K_h := \begin{cases} \frac{140 - H}{70} & \text{if } H < 80 \\ \frac{3 \cdot (100 - H)}{70} & \text{if } H \geq 80 \end{cases}$$

Dimana :

H = kelembaban relatif (%)



Gambar 4-4 Faktor K_s

Tabel 4-3 Faktor K_h

Average Ambient Relative Humidity %	K_h
40	1.43
50	1.29
60	1.14
70	1.00
80	0.86
90	0.43
100	0.00

CONTOH 4.4	Kehilangan Akibat Susut Beton	4																		
SOAL : Hitung kehilangan akibat susut beton pasca-tarik pada contoh 2.1 dengan menggunakan : a. Metoda PCI b. Metoda AASHTO																				
Diberikan : Jenis prategang Post = "Ya" (Post-tension) Jenis curing Moist = "Ya" (moist curing) Waktu setelah curing t = 14 (hari) Kelembaban relatif R _h = 70 (%) Asumsi : S = 1 (Luas permukaan yang terekspos) V = 2 · S V = 2 (Volume beton)																				
Langkah 1 : Hitung Kehilangan akibat Susut Beton a. Rumus PCI (Metoda K _{sh}), K _{sh} bernilai 1 untuk pratarik, adapun untuk Pasca-tarik lihat tabel dibawah K _{sh} = <table><tr><td>t (hari)</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>10</td><td>20</td><td>30</td><td>60</td></tr><tr><td>K_{sh}</td><td>0.92</td><td>0.85</td><td>0.8</td><td>0.77</td><td>0.73</td><td>0.64</td><td>0.58</td><td>0.45</td></tr></table> t K _{sh} = 0.694 $\Delta f_{sh_1} = 8.2 \cdot 10^{-6} \cdot K_{sh} \cdot E_{ps} \cdot \left(1 - 0.006 \cdot \frac{V}{S}\right) \cdot (100 - R_h)$ $\Delta f_{sh_1} = 32.892 \text{MPa}$ b. Rumus AASHTO			t (hari)	1	3	5	7	10	20	30	60	K _{sh}	0.92	0.85	0.8	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45
t (hari)	1	3	5	7	10	20	30	60												
K _{sh}	0.92	0.85	0.8	0.77	0.73	0.64	0.58	0.45												

$$\Delta f_{sh_2} = \begin{cases} (117 - 1.03R_h) \text{ MPa} & \text{if Post} \neq \text{"Ya"} \\ (93 - 0.85 \cdot R_h) \cdot \text{MPa} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta f_{sh_2} = 33.5 \text{ MPa}$$

$$\Delta f_{sh_j} = \max(\Delta f_{sh_1}, \Delta f_{sh_2})$$

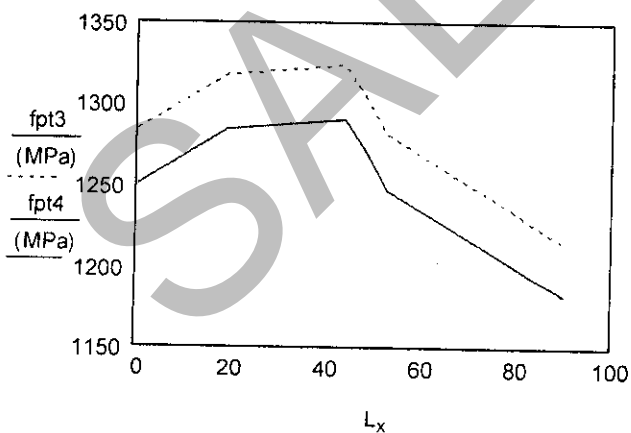
$$\max(\Delta f_{sh_1}, \Delta f_{sh_2}) = 33.5 \text{ MPa}$$

Langkah 2: Tegangan prategang setelah susut

$$f_{pt4_j} = f_{pt3_j} - \Delta f_{sh_j}$$

j	$f_{pt_{asal}}$ MPa	Δf_{sh} MPa	f_{pt} MPa
0	1284.025	33.500	1250.525
1	1317.532	33.500	1284.032
2	1323.202	33.500	1289.702
3	1302.631	33.500	1269.131
4	1280.600	33.500	1247.100
5	1244.792	33.500	1211.292
6	1214.797	33.500	1181.297

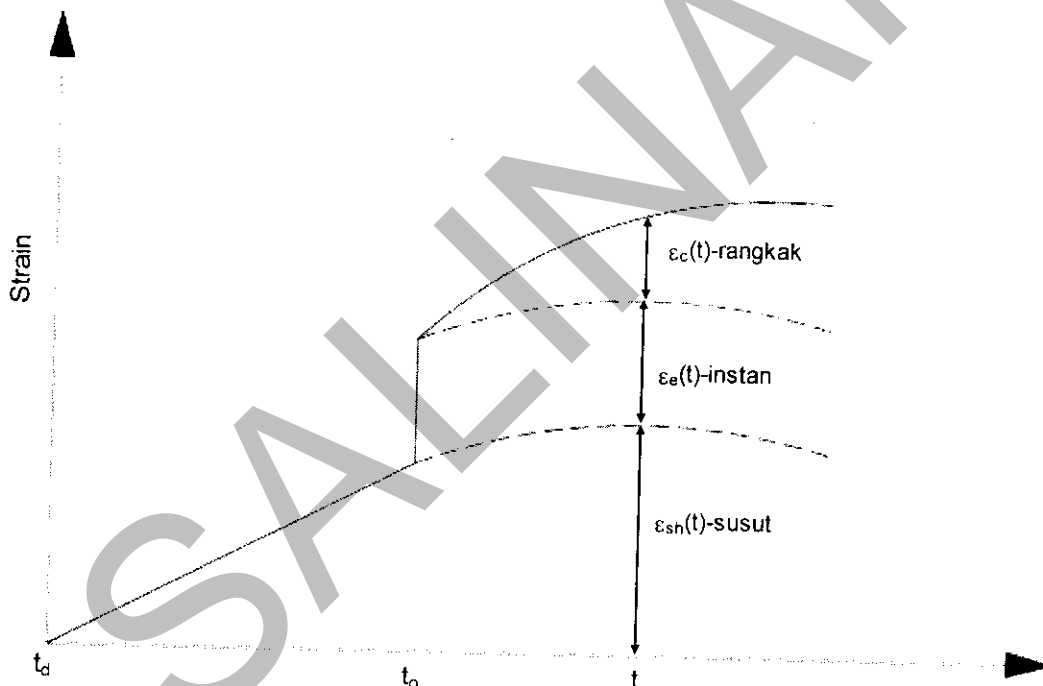
$$\begin{bmatrix} f_{pt3} & \Delta f_{sh} \\ \text{(MPa)} & \text{(MPa)} \end{bmatrix}$$



4.6 Kehilangan Akibat Rangkak Beton

Pada bab awal telah diterangkan mengenai kurva tegangan-regangan beton. Kurva tersebut sangat tergantung pada besarnya pembebanan dan *time-history* pembebanan. Bila material beton ditekan oleh pembebanan tertentu secara konstan sehingga regangan beton meningkat, maka peristiwa ini disebut rangkak.

Regangan atau deformasi pada beton umumnya disebabkan oleh 3 hal yaitu susut, rangkak dan beban itu sendiri. Regangan akibat susut dan rangkak disebut regangan fungsi waktu (*time-dependent*), sedangkan regangan akibat beban disebut regangan seketika. Komponen regangan ini dapat dilihat pada gambar 4-5.



Gambar 4-5 Regangan vs waktu untuk specimen dibawah tegangan konstan

Regangan susut mulai terjadi sesaat setelah pengeringan dimulai pada waktu t_d (seketika setelah setting atau pada akhir *moist curing*). Regangan susut terus meningkat seiring dengan penambahan waktu. Saat tegangan pertama diaplikasikan

pada t_0 , tegangan ini menyebabkan lonjakan regangan secara seketika dalam diagram regangan yang langsung diikuti pula oleh regangan rangkak.

Perkiraan kehilangan tegangan akibat rangkak dapat dihitung dengan menggunakan rumusan dari AASHTO (CL. 5.9.5.4.3 AASHTO-2004) sebagai berikut:

$$\Delta f_{cr} = 12 \cdot f_{cs} - 7 \cdot \Delta f_{cdp} \geq 0,0$$

Catatan

f_{cs} = tegangan beton di level pusat prategang

Δf_{cdp} = perbedaan tegangan beton di level pusat pratekan akibat beban permanen dengan pengecualian beban yang bekerja saat gaya pratekan diaplikasikan

CONTOH 4.5	Kehilangan Akibat Rangkak Beton	5
SOAL : Hitung kehilangan akibat rangkak beton pasca-tarik pada contoh 2.1 dengan menggunakan : a. Metoda AASHTO b. Metoda ACI-ASCE		
Diberikan : Jenis prategang Post = "Ya" (Post-tension) Beban mati superimposed $Q_{sd} = 5.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$		
Langkah 1 : Momen akibat superimposed Beban mati superimposed $Q_{sd} = 5.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $M_{SD}(x) = \frac{1}{2} \cdot Q_{sd} \cdot L_b \cdot x - \frac{Q_{sd}}{2} \cdot x^2$		$M_{SD}(x)$ adalah momen akibat beban mati superimposed yang didefinisikan sebagai fungsi terhadap jarak x dari ujung penarikan.

j	L_x m	M_{SD} kN m
0	0.00	0.00
1	19.20	1,520.64
2	43.20	570.24
3	48.00	0.00
4	52.20	436.59
5	73.20	1,164.24
6	90.00	0.00

$$\left(L_x \frac{M_{SD}}{\text{kN} \cdot \text{m}} \right)$$

Langkah 2: Tegangan akibat superimposed

$$f_{csd_j} = \frac{M_{SD_j}}{I_{c_j}} \cdot e_x$$

$$\Delta f_{cdp_j} = f_{cs_j} - f_{csd_j}$$

j	f_{cs} MPa	f_{csd} MPa	Δf_{cdp} MPa
0	1.674	0.000	1.674
1	-4.725	0.301	-5.026
2	2.939	-0.041	2.980
3	2.263	0.000	2.263
4	2.688	-0.031	2.720
5	-2.878	0.230	-3.109
6	1.674	0.000	1.674

$$\left(\frac{f_{cs}}{\text{MPa}} \quad \frac{f_{csd}}{\text{MPa}} \right)$$

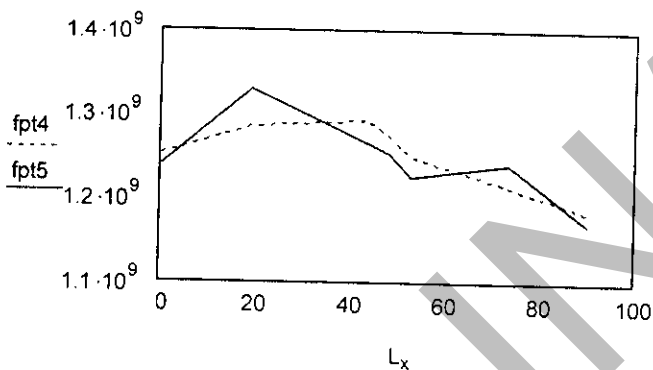
f_{csd} = tegangan akibat beban mati superimposed di level tendon prategang.

f_{cs} = tegangan akibat beban mati berat sendiri balok di level tendon prategang.

Langkah 3 : Menghitung kehilangan tegangan akibat rangkak	
<p>Rumus AASHTO</p> $\Delta f_{crj} = 12 \cdot f_{csj} - 7 \cdot \Delta f_{cdpj}$	$\Delta f_{cr} = \begin{pmatrix} 8.37 \\ -21.519 \\ 14.411 \\ 11.317 \\ 13.223 \\ -12.778 \\ 8.37 \end{pmatrix} \text{ MPa}$
<p>Rumus ACI-ASCE</p> $K_{cr} = \begin{cases} 2 & \text{if Post} \neq \text{"Ya"} \\ 1.6 & \text{otherwise} \end{cases}$ <p>$K_{cr} = 1.6$</p> $\Delta f_{cr} = K_{cr} \cdot \frac{E_{ps}}{E_c} \cdot (f_{cs} - f_{csd})$	$\Delta f_{cr} = \begin{pmatrix} 14.346 \\ -43.073 \\ 25.542 \\ 19.398 \\ 23.309 \\ -26.641 \\ 14.346 \end{pmatrix} \text{ MPa}$
Langkah 4 : Tegangan prategang setelah rangkak	
$f_{pt5j} = f_{pt4j} - \Delta f_{crj}$	

j	fpt _{asal} MPa	Δf _{CR} MPa	fpt MPa
0	1250.525	14.346	1236.179
1	1284.032	-43.073	1327.106
2	1289.702	25.542	1264.160
3	1269.131	19.398	1249.733
4	1247.100	23.309	1223.791
5	1211.292	-26.641	1237.933
6	1181.297	14.346	1166.951

$$\left(\begin{array}{cc} \text{fpt4} & \Delta f_{cr} \\ \text{MPa} & \text{MPa} \end{array} \right)$$



4.7 Kehilangan Akibat Relaksasi

Relaksasi baja prategang harus diperhitungkan sebagai faktor yang mempengaruhi kehilangan gaya prategang. Besarnya kehilangan relaksasi tidak hanya tergantung pada lamanya waktu diaplikasikan gaya prategang, tetapi juga berdasarkan rasio f_{pi}/f_{py} tegangan awal (*initial*) dengan tegangan leleh tulangan prategang. Jika tidak ada perhitungan yang lebih teliti, maka kehilangan tegangan dalam tendon akibat relaksasi baja prategang harus diambil sebesar :

$$\Delta f_r = f_{pi} \left(\frac{\log(t_2) - \log(t_1)}{10} \right) \cdot \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad \text{untuk baja stress-relieved, atau}$$

$$\Delta f_r = f_{pi} \left(\frac{\log(t_2) - \log(t_1)}{40} \right) \cdot \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad \text{untuk baja low-relaxation.}$$

Dimana :

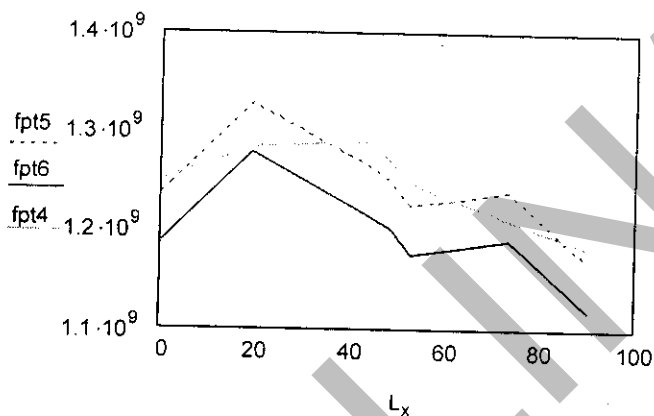
- t_2, t_1 = waktu akhir dan awal interval [jam]
 f_{pi} = tegangan awal baja prategang [MPa]
 Δf_r = Kehilangan akibat relaksasi [MPa]

CONTOH 4.6	Kehilangan Akibat Relaksasi	6
SOAL : Hitung kehilangan akibat relaksasi pada contoh 2.1 dengan kondisi sebagai berikut : a. tahap I, saat transfer gaya prategang b. tahap II, saat beban superimposed diletakan c. tahap III, setelah 2 tahun beban superimposed diletakan.		
Diberikan : Jenis baja prategang: Low_relax = "Ya"		
Tahap I, saat transfer Lama hari sebelum transfer $t_1 = 18$ (hari) $t_0 = 1$ Kehilangan akibat relaksasi saat transfer $\Delta f_{r1} = \begin{cases} f_{pj} \left(\frac{\log(t_1 \cdot 24) - \log(t_0)}{10} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{if Low_relax} \neq \text{"Ya"} \\ f_{pj} \left(\frac{\log(t_1 \cdot 24) - \log(t_0)}{40} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$ $\Delta f_{r1} = 30.547 \text{ MPa}$		
Tahap II, saat superimposed diletakan Kehilangan setelah umur 30 hari $t_2 = 30$ (hari) $t_1 = 18$ Kehilangan akibat relaksasi umur 30 hari		

$\Delta f_{r2} = \begin{cases} f_{pj} \cdot \left(\frac{\log(t_2 \cdot 24) - \log(t_1 \cdot 24)}{10} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{if Low_relax} \neq "Ya" \\ f_{pj} \cdot \left(\frac{\log(t_2 \cdot 24) - \log(t_1 \cdot 24)}{40} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$ <p>$\Delta f_{r2} = 2.571 \text{ MPa}$</p>	
<p>Tahap III, setelah 2 tahun superimposed diletakan</p> <p>Kehilangan setelah umur 2 tahun $t_2 = 365 \cdot 2$ (hari) $t_1 = 30$</p> <p>Kehilangan akibat relaksasi umur 30 hari</p> $\Delta f_{r3} = \begin{cases} f_{pj} \cdot \left(\frac{\log(t_2 \cdot 24) - \log(t_1 \cdot 24)}{10} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{if Low_relax} \neq "Ya" \\ f_{pj} \cdot \left(\frac{\log(t_2 \cdot 24) - \log(t_1 \cdot 24)}{40} \right) \cdot \left(\frac{f_{pj}}{f_{py}} - 0.55 \right) & \text{otherwise} \end{cases}$ <p>$\Delta f_{r3} = 16.067 \text{ MPa}$</p>	
<p>Tegangan akhir prategang setelah relaksasi</p> <p>$\Delta f_r = \Delta f_{r1} + \Delta f_{r2} + \Delta f_{r3}$ $\Delta f_r = 49.186 \text{ MPa}$</p> <p>$f_{pt6j} = f_{pt5j} - \Delta f_r$</p>	

j	$f_{pt\text{ asal}}$ MPa	Δf_{CR} MPa	f_{pt} MPa
0	1236.179	49.186	1186.993
1	1327.106	49.186	1277.920
2	1264.160	49.186	1214.974
3	1249.733	49.186	1200.547
4	1223.791	49.186	1174.605
5	1237.933	49.186	1188.747
6	1166.951	49.186	1117.765

$$\left(\begin{array}{cc} f_{pt5} & \Delta f_r \\ \text{MPa} & \text{MPa} \end{array} \right)$$



4.8 Kehilangan Total

Perhitungan jumlah keseluruhan kehilangan prategang antara pra-tarik dan pasca-tarik sangat berbeda, karena perbedaan metoda yang dipakai. Total kehilangan untuk masing-masing dapat dihitung sebagai berikut:

(i) Pra-tarik

$$\Delta f_T = \Delta f_{ES} + \Delta f_r + \Delta f_{cr} + \Delta f_{sh}$$

Dimana :

Δf_T = total kehilangan [MPa]

Δf_{ES} = kehilangan akibat pemendekan beton [MPa]

Δf_r = kehilangan akibat relaksasi [MPa]

$\Delta f_{cr}, \Delta f_{sh}$ = kehilangan akibat rangkai dan susut [MPa]

(ii) Pasca-tarik

$$\Delta f_T = \Delta f_A + \Delta f_r + \Delta f_{ES} + \Delta f_r + \Delta f_{cr} + \Delta f_{sh}$$

Dimana :

Δf_T = total kehilangan [MPa]

Δf_A = kehilangan akibat slip ankur [MPa]

Δf_r = kehilangan akibat friksi [MPa]

Δf_{ES} = kehilangan akibat pemendekan beton, pada pasca-tarik tidak ada jika tendon ditarik secara simultan [MPa]

$\Delta f_{cr}, \Delta f_{sh}$ = kehilangan akibat rangkai dan susut [MPa]

CONTOH 4.7	Kehilangan Total	4
SOAL : Hitung kehilangan total pada contoh 2.1:		
Berdasarkan perhitungan pada contoh 2.1 s.d contoh 2.5 dapat dihitung kehilangan total sebagai berikut,		
$\Delta f_{tot} = \begin{cases} \Delta f_j + \Delta f_{a_j} + \Delta f_{ES_j} + \Delta f_r + \Delta f_{cr_j} + \Delta f_{sh_j} & \text{if Post} = "Ya" \\ \Delta f_{ES_j} + \Delta f_r + \Delta f_{cr_j} + \Delta f_{sh_j} & \text{otherwise} \end{cases}$		
$\Delta f_{tot} =$ MPa		
	0	
0	208.007	
1	117.08	
2	180.026	
3	194.453	
4	220.395	
5	206.253	
6	277.235	

Persentase kehilangan total terhadap fpj

$$\frac{\Delta f_{tot}}{f_{pj}} = \quad \%$$

	0
0	14.911
1	8.393
2	12.905
3	13.939
4	15.799
5	14.785
6	19.873

5 ANALISIS STRUKTUR

5.1 Umum

Pada struktur statis tertentu deformasi penampang individual dapat terjadi tanpa memperhitungkan kekangan di perletakan dan gaya dalam dapat ditentukan dengan prinsip statis biasa.

Adapun pada struktur statis tak tentu gaya dalam sangat tergantung pada kekakuan relatif member terhadap kekakuan individual lainnya. Dalam analisis struktur statis tak tentu, kompatibilitas geometrik perlu ditambahkan dalam persamaan keseimbangan.

5.2 Struktur Statis Tertentu (ST)

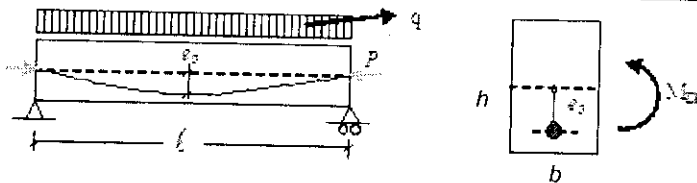
Struktur statis tertentu adalah struktur yang dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan keseimbangan biasa untuk memperoleh gaya-gaya dalam. Dimana bilangan yang tidak diketahui harus memenuhi 3 persamaan sebagai berikut:

$$\Sigma M = 0,$$

$$\Sigma V = 0, \text{ dan}$$

$$\Sigma H = 0$$

Analisa Struktur Balok Sederhana (Simple-Beam)



Diketahui :

$$P := 525 \text{ kN} \quad (\text{setelah semua losses})$$

$$q := 7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$L_{\text{eff}} := 12 \text{ m} \quad e_o := 200 \text{ mm}$$

$$b := 300 \text{ mm} \quad h := 600 \text{ mm}$$

Modulus elastisitas beton $E_c := 25000 \text{ MPa}$

Momen inersia $I_c := \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad I_c = 5.4 \times 10^{-3} \text{ m}^4$

1. Mencari kebutuhan gaya prategang, P (optimum)

Besarnya P dapat diperoleh dari 2 buah persamaan lendutan pada tabel 3.3a sub bab 3.6

Simple span dengan beban merata: $\Delta = \frac{5}{384} \frac{w \ell^4}{EI} \quad w = q$

Simple span dengan bentuk parabolik: $\Delta = \left[e_e + \frac{5}{6} (e_c - e_e) \right] \frac{P \ell^2}{8EI}$

Dengan memasukkan nilai $e_e := 0 \quad e_c := e_o$ maka diperoleh

$$P_{\text{opt}} := \frac{1}{8} \cdot \frac{q \cdot L^2}{e_c} \quad P_{\text{opt}} = 630 \text{ kN}$$

2. Mencari beban merata ekivalen dengan gaya P aktual

$$q_p := -8 \cdot \frac{P \cdot e_c}{L^2} \quad q_p = -5.833 \frac{kN}{m}$$

3. Menghitung Gaya Dalam

Akibat q

$$\text{Momen : } M_q(x) := \frac{q \cdot L}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q \cdot x^2$$

$$\text{Geser: } V_q(x) := \frac{q \cdot L}{2} - q \cdot x$$

Akibat q_p

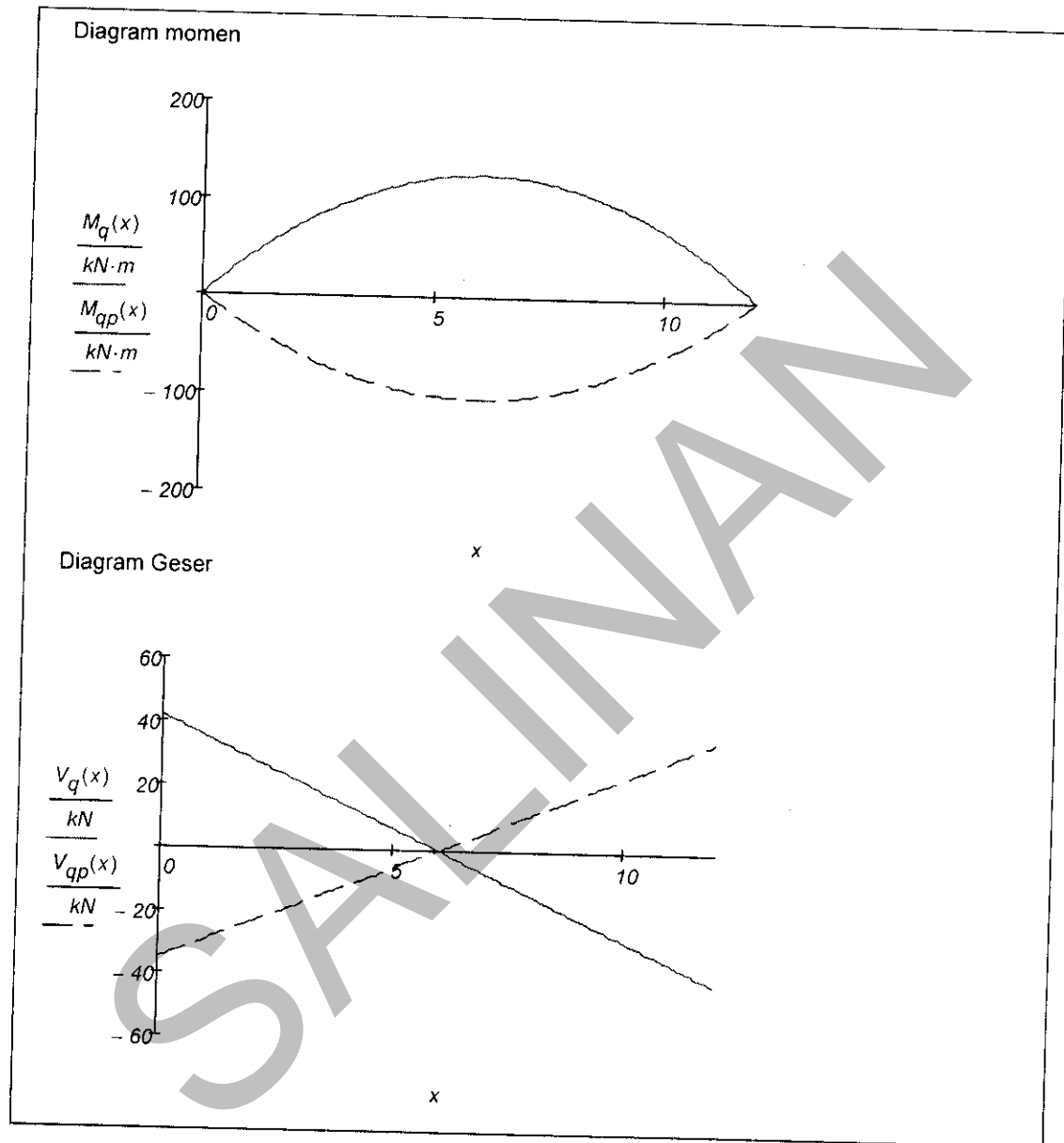
$$\text{Momen : } M_{qp}(x) := \frac{q_p \cdot L}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q_p \cdot x^2$$

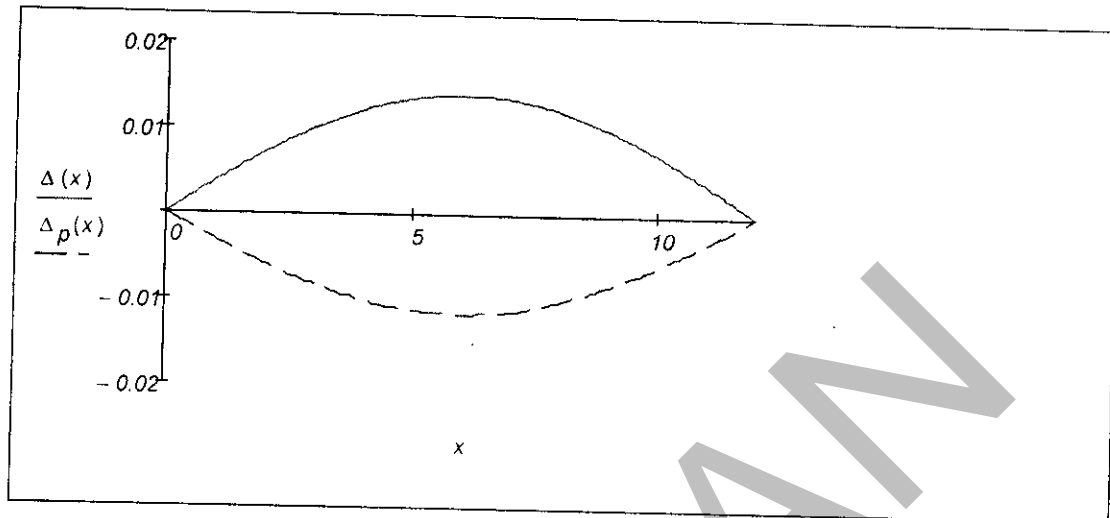
$$\text{Geser: } V_{qp}(x) := \frac{q_p \cdot L}{2} - q_p \cdot x$$

4. Menghitung lendutan

$$\Delta(x) := \frac{q \cdot x}{24 \cdot E_c \cdot I_c} \cdot (L^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + x^3) \quad \Delta(0.5L) = 14 \text{ mm}$$

$$\Delta_p(x) := \frac{q_p \cdot x}{24 \cdot E_c \cdot I_c} \cdot (L^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + x^3) \quad \Delta_p(0.5L) = -11.667 \text{ mm}$$





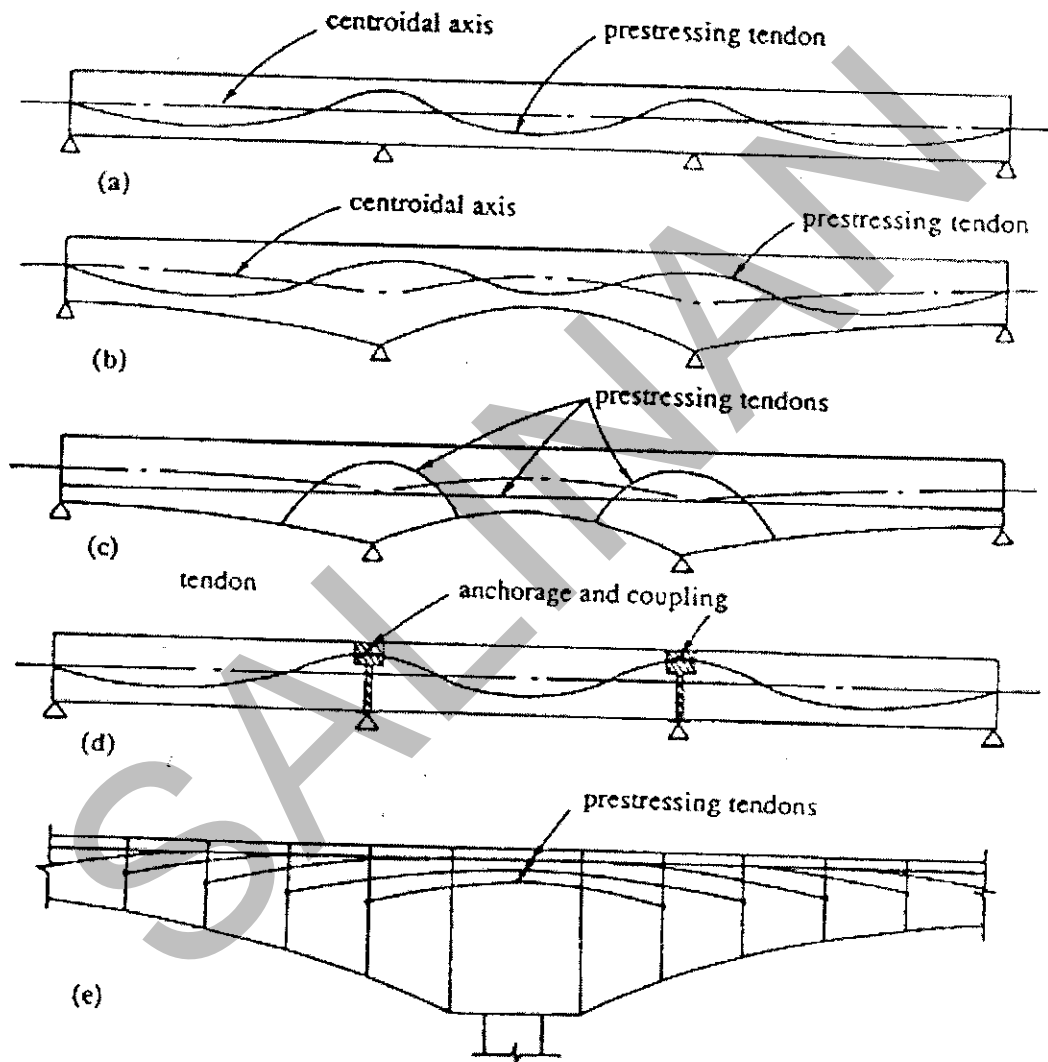
5.3 Struktur Statis Tak Tentu (STT)

Seperti di beton bertulang dan material struktural lainnya, sistem menerus dapat dibuat dari elemen horizontal seperti balok yang disatukan dari ujung ke ujung dengan memberi perletakan intermediate/antara pada setiap bentangnya atau menambah kaki pada sistem rangka. Seiring dengan pengurangan momen dan tegangan pada midspans melalui perancangan sistem menerus menghasilkan bentuk penampang yang lebih kecil dan lebih kaku dibanding struktur perletakan sederhana dengan bentang dan beban yang sama. Disamping itu struktur menerus menghasilkan lendutan atau defleksi yang lebih kecil. Akhirnya sebagai konsekuensi, struktur yang lebih ringan dengan pondasi yang lebih ringan pula diharapkan dapat menekan ongkos material dan konstruksi. Sebagai tambahan juga, stabilitas struktural dan ketahanan lateral dan longitudinal pada umumnya meningkat dengan sistem menerus. Sebagai hasilnya, perbandingan span-to-depth dapat ditingkatkan, tergantung pada jenis sistem menerus yang dipertimbangkan. Struktur flat plates, dapat menggunakan perbandingan span-to-depth 40 ~ 45, sedangkan balok box girder mencapai 25 ~ 30.

Suatu keuntungan tambahan lagi dari sistem menerus adalah penghapusan angkur pada perletakan intermediate dengan cara melakukan post-tensioning menerus atas beberapa span sekaligus, dengan demikian mengurangi lebih lanjut ongkos material dan tenaga kerja. Beton pra tekan menerus secara luas diterapkan dalam konstruksi

jembatan berbentang panjang. Jembatan box girder kantilever yang dibuat secara segmental, secara luas banyak digunakan di eropa.

Aplikasi jembatan dengan tendon menerus dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 5-1 Kurva tegangan-regangan 7-wire stress-relieved dan low relaxation (Nawy, 1996)

5.3.1 Kerugian Kontinuitas Prategang

Ada beberapa kerugian bila struktur dibuat menjadi sistem menerus:

1. Kehilangan friksi menjadi lebih tinggi dalam kaitan dengan jumlah tekukan yang lebih banyak dan tendon yang lebih panjang.
2. Pertemuan momen dan geser besar di bagian perletakan, yang mengurangi kekuatan momen pada potongan itu.
3. Momen dan gaya lateral yang berlebihan di dalam kolom penyangga, terutama jika dihubungkan secara kaku dengan balok. gaya ini terjadi oleh karena pemendekan elastis sepanjang balok di bawah gaya prategang.
4. Efek tegangan sekunder yang lebih besar berkaitan dengan adanya penyusutan, rangkai, variasi temperatur, dan penurunan perletakan.
5. Momen sekunder dalam kaitan dengan reaksi di kolom penopang disebabkan oleh gaya prategang.
6. Pembalikan momen yang serius mungkin saja terjadi dalam kaitan dengan kombinasi pembebanan tertentu.
7. Adanya momen tambahan di perletakan interior yang memerlukan penulangan tambahan, yang mungkin tidak diperlukan bila menggunakan sistem perletakan sederhana.

5.3.2 Metode Perhitungan

Penyelesaian analisis struktur statis tak tentu dapat ditempuh dengan bermacam-macam cara, beberapa cara diantaranya yang cukup mudah dan sederhana adalah dengan cara persamaan 3-momen dan distribusi momen *cross*. Kedua metoda ini akan dibahas pada uraian selanjutnya di bawah ini.

5.3.3 Teorema 3 Momen (Clapeyron)

Metoda 3-momen sangat efektif untuk menghitung momen lentur pada struktur dengan lebih dari 3 perletakan yang berturutan. Konsep perhitungan 3-momen dapat dikategorikan sebagai metoda gaya (*force methode*), yaitu menggunakan momen perletakan (di tengah) sebagai redundan sehingga balok dapat dianalisis sebagai balok di atas dua perletakan sederhana. Ambil dua span bentang menerus yang berturutan AB dan BC seperti dapat dilihat pada gambar 5.2. Gunakan momen tengah M_b sebagai redundan dengan membayangkan terdapat sendi engsel (*hinges*) dimana M_b berada. Kemudian, aplikasikan M_b pada hinge dan momen lainnya M_a dan M_c . Arah positif adalah momen yang menekan serat atas lihat gambar 5.2c. Gunakan *momen area methode* untuk menghitung putaran sudut θ_{ba} dan θ_{bc} akibat beban luar dan momen redundan :

$$\theta_{ba} = \frac{\Delta_{AB}}{L} = \frac{1}{L} \int_a^b \frac{M_x}{EI} \cdot x \, dx \quad \text{(Pers. 5.1)}$$

$$\theta_{ba} = \frac{1}{L_1} \left[\frac{A_1}{E \cdot I_1} \cdot x_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{3} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \cdot \left(\frac{2L_1}{3} \right) \right]$$

$$\theta_{ba} = \frac{A_1 \cdot x_1}{E \cdot I_1 \cdot L_1} + \frac{1}{6} \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 + \frac{2}{6} \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \quad \text{(Pers. 5.2)}$$

$$\theta_{bc} = \frac{\Delta_{CB}}{L} = \frac{1}{L} \cdot \int_c^b \frac{M_x}{EI} \cdot x \, dx \quad (\text{Pers. 5.3})$$

$$\theta_{bc} = \frac{1}{L_2} \left[\frac{A_2}{E \cdot I_2} \cdot x_2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{M_c}{E \cdot I_2} \right) \cdot L_2 \cdot \left(\frac{L_2}{3} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{M_b}{E \cdot I_2} \right) \cdot L_2 \cdot \left(\frac{2L_2}{3} \right) \right]$$

$$\theta_{bc} = \frac{A_2 \cdot x_2}{E \cdot I_2 \cdot L_2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{M_c}{E \cdot I_2} \right) \cdot L_2 + \frac{2}{6} \cdot \left(\frac{M_b}{E \cdot I_2} \right) \cdot L_2 \quad (\text{Pers. 5.4})$$

Untuk konsistensi deformasi struktur :

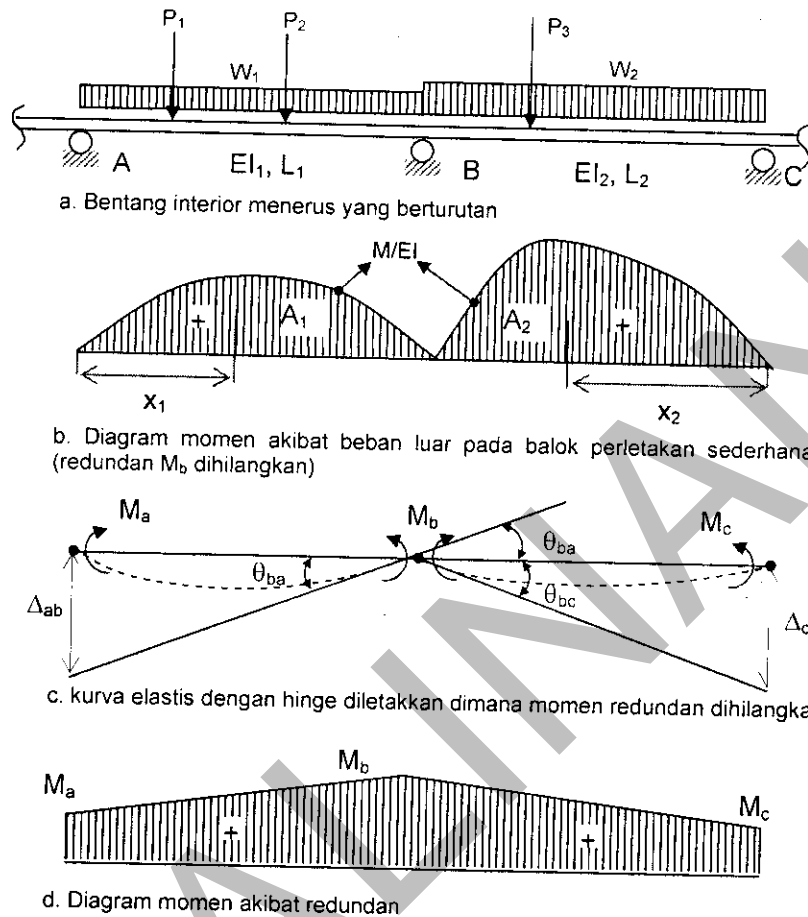
$$\theta_{ba} + \theta_{bc} = 0 \quad (\text{Pers. 5.5})$$

Dengan menyelesaikan persamaan di atas, maka dapat disusun persamaan 3-momen berikut:

$$M_a \cdot \left(\frac{L_1}{EI_1} \right) + 2 \cdot M_b \cdot \left(\frac{L_1}{EI_1} + \frac{L_2}{EI_2} \right) + M_c \cdot \left(\frac{L_2}{EI_2} \right) = -6 \cdot \frac{A_1 \cdot x_1}{E \cdot I_1 \cdot L_1} - 6 \cdot \frac{A_2 \cdot x_2}{E \cdot I_2 \cdot L_2} \quad (\text{Pers. 5.6})$$

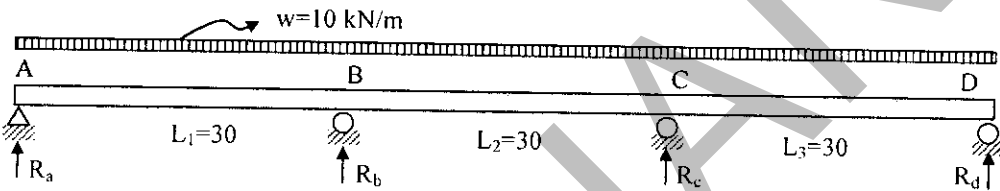
Dimana :

- M_a, M_b, M_c : momen-momen pada 2 bentang yang berturutan. (lihat gambar 5.2)
- A_1, A_2 : luas diagram momen pada bentang 1 dan bentang 2 akibat gaya luar dengan masing-masing span dipertimbangkan sebagai perletakan sederhana (*simple span*).
- x_1, x_2 : jarak titik pusat luasan A_1 dan A_2 pada metode momen area.
- L_1, L_2 : Panjang bentang 1 dan bentang 2.
- EI_1, EI_2 : Kekakuan batang yang terdiri dari modulus elastisitas dan momen inersia pada bentang 1 dan bentang 2.



Gambar 5-2 Teorema tiga momen

Aplikasi perhitungan analisis struktur dengan metoda 3-momen dapat dilihat pada contoh sebagai berikut:

CONTOH 5.1	Analisis Struktur Balok Menerus Metoda 3-Momen (Clapeyron)	1 1
<p>SOAL : Berikut ini adalah contoh perhitungan analisis struktur tiga bentang dengan panjang bentang dan beban merata seragam untuk seluruh bentang. Gaya dalam untuk kasus seperti ini dapat diperoleh dengan persamaan tiga momen maupun koefisien momen pada lampiran B.1 manual ini.</p>		
		
<p>Diketahui :</p> <p>Modulus elastisitas beton $E_c := 25000 \text{ MPa}$</p> <p>Momen inersia $I_c := 0.5 \cdot \text{m}^4$</p> <p>$P := 525 \text{ kN}$ (setelah semua losses)</p> <p>$w := 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$</p> <p>$L_1 := 30 \text{ m}$ $I_1 := I_c$ $I_1 = 0.5 \text{ m}^4$</p> <p>$L_2 := 30 \text{ m}$ $I_2 := I_c$ $I_2 = 0.5 \text{ m}^4$</p> <p>$L_3 := 30 \text{ m}$ $I_3 := I_c$ $I_3 = 0.5 \text{ m}^4$</p>		

1. Menuliskan persamaan momen sepasang span yang bersebelahan

Tinjau span 1 dan 2

$$M_a \cdot \left(\frac{L_1}{I_1} \right) + 2 \cdot M_b \cdot \left(\frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_c \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} \right) = \frac{-1}{4} \cdot \left(\frac{w \cdot L_1^3}{I_1} + \frac{w \cdot L_2^3}{I_2} \right)$$

Tinjau span 2 dan 3

$$M_b \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} \right) + 2 \cdot M_c \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} + \frac{L_3}{I_3} \right) + M_d \cdot \left(\frac{L_3}{I_3} \right) = \frac{-1}{4} \cdot \left(\frac{w \cdot L_2^3}{I_2} + \frac{w \cdot L_3^3}{I_3} \right)$$

2. Menentukan batasan-batasan (*boundary*) dan momen perletakan yang tak diketahui

Karena $M_a=0$ dan $M_d=0$ maka persamaan akan disederhanakan lagi sehingga dapat diselesaikan (2 unknown dan 2 persamaan) sebagai berikut:

Tinjau span 1 dan 2

$$2 \cdot M_b \cdot \left(\frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_c \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} \right) = \frac{-1}{4} \cdot \left(\frac{w \cdot L_1^3}{I_1} + \frac{w \cdot L_2^3}{I_2} \right)$$

Tinjau span 2 dan 3

$$M_b \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} \right) + 2 \cdot M_c \cdot \left(\frac{L_2}{I_2} + \frac{L_3}{I_3} \right) = \frac{-1}{4} \cdot \left(\frac{w \cdot L_2^3}{I_2} + \frac{w \cdot L_3^3}{I_3} \right)$$

Persamaan diatas dapat disederhanakan kembali dengan mengalikan ruas kiri dan kanan dengan nilai Inersia, I_c sehingga persamaan menjadi sebagai berikut:

$$M_b := 1 \cdot kN \cdot m \quad M_c := 1 \cdot kN \cdot m$$

Given

$$2 \cdot M_b \cdot 60m + M_c \cdot 30m = -1.35 \times 10^5 m^2 kN$$

$$M_b \cdot 30m + 2M_c \cdot 60m = -1.35 \times 10^5 m^2 kN$$

$$\text{Find}(M_b, M_c) = \begin{pmatrix} -900 \\ -900 \end{pmatrix} \cdot kN \cdot m$$

Nilai ini menunjukkan hasil yang sama dengan koefisien momen pada Lampiran B.1

$$M_b := -0.1 \cdot w \cdot L_1^2 \quad M_b = -900 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_c := -0.1 \cdot w \cdot L_1^2 \quad M_c = -900 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Menentukan reaksi perletakan

$$M_a := 0 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_d := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{ab} := \frac{w \cdot L_1}{2} - \frac{M_a - M_b}{L_1} \quad R_{ab} = 120 \cdot \text{kN}$$

$$R_{ba} := \frac{w \cdot L_1}{2} + \frac{M_a - M_b}{L_1} \quad R_{ba} = 180 \cdot \text{kN}$$

$$R_{bc} := \frac{w \cdot L_2}{2} - \frac{M_b - M_c}{L_2} \quad R_{bc} = 150 \cdot \text{kN}$$

$$R_{cb} := \frac{w \cdot L_2}{2} + \frac{M_b - M_c}{L_2} \quad R_{cb} = 150 \cdot \text{kN}$$

$$R_{cd} := \frac{w \cdot L_3}{2} - \frac{M_c - M_d}{L_3} \quad R_{cd} = 180 \cdot \text{kN}$$

$$R_{dc} := \frac{w \cdot L_3}{2} + \frac{M_c - M_d}{L_3} \quad R_{dc} = 120 \cdot \text{kN}$$

$$R_a := R_{ab} \quad R_a = 120 \cdot \text{kN}$$

$$R_b := R_{ba} + R_{bc} \quad R_b = 330 \cdot \text{kN}$$

$$R_c := R_{cb} + R_{cd} \quad R_c = 330 \cdot \text{kN}$$

$$R_d := R_{dc} \quad R_d = 120 \cdot \text{kN}$$

Nilai ini menunjukkan hasil yang sama dengan koefisien geser pada Lampiran B.1

$$R_a := \frac{4}{10} \cdot w \cdot L_1 \quad R_a = 120 \cdot kN$$

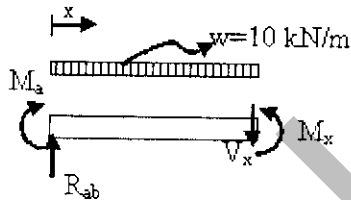
$$R_b := \left(\frac{6}{10} \right) \cdot w \cdot L_1 + \left(\frac{5}{10} \right) \cdot w \cdot L_2 \quad R_b = 330 \cdot kN$$

$$R_c := \left(\frac{5}{10} \right) \cdot w \cdot L_2 + \left(\frac{6}{10} \right) \cdot w \cdot L_3 \quad R_c = 330 \cdot kN$$

$$R_d := \frac{4}{10} \cdot w \cdot L_3 \quad R_d = 120 \cdot kN$$

4. Menentukan momen dan geser maksimum

a. Momen maksimum sepanjang bentang A dan B



$$M_x(x) := R_{ab} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot w \cdot x^2$$

Momen maksimum terjadi bila nilai diferensial fungsi momen di atas = 0.

Nilai awal $x := 1m$

Given

$$\frac{d}{dx} M_x(x) = 0 \quad x := \text{Find}(x) \quad x = 12m$$

$$M_x(x) = 720 \cdot kN \cdot m$$

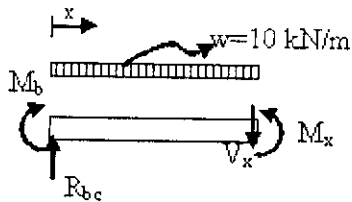
Nilai ini sesuai dengan koefisien momen $0.08 \cdot w \cdot L_1^2 = 720 \cdot kN \cdot m$

Geser yang terjadi pada awal dan akhir bentang

$$V_x(x) := \frac{d}{dx} M_x(x) \quad V_x(0) = 120 \cdot \text{kN}$$

$$V_x(L_1) = -180 \cdot \text{kN}$$

b. Momen maksimum sepanjang bentang B dan C



$$M_x(x) := M_b + R_{bc} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot w \cdot x^2$$

Momen maksimum terjadi bila nilai diferensial fungsi momen di atas = 0.

Nilai awal $x := 1\text{m}$

Given

$$\frac{d}{dx} M_x(x) = 0 \quad x := \text{Find}(x) \quad x = 15\text{m}$$

$$M_x(x) = 225 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

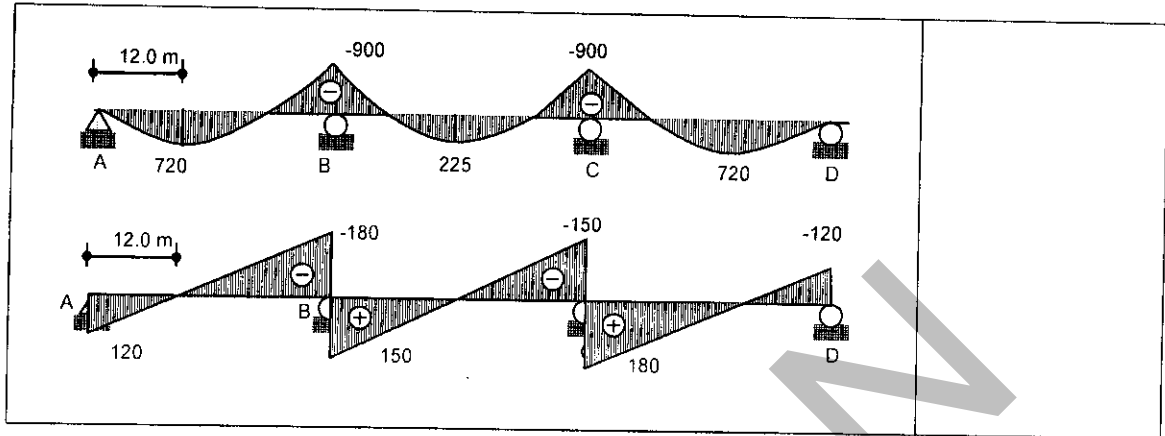
$$\text{Nilai ini sesuai dengan koefisien momen} \quad 0.025 \cdot w \cdot L_2^2 = 225 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Geser yang terjadi pada awal dan akhir bentang

$$V_x(x) := \frac{d}{dx} M_x(x) \quad V_x(0) = 150 \cdot \text{kN} \quad V_x(0) = 150 \cdot \text{kN}$$

$$V_x(L_1) = -150 \cdot \text{kN}$$

Diagram momen:



5.3.4 Distribusi Momen Cross

Cara distribusi momen dapat digunakan untuk menganalisa semua jenis balok atau kerangka kaku statis tak tentu. Metoda ini waktu pertama kali diperkenalkan oleh Hardy Cross merupakan sebuah konsep pendekatan untuk mendapatkan jawaban nilai eksak dari sebuah analisis struktur dengan melakukan iterasi yang cukup.

Langkah-langkah :

1. tentukan besarnya kekakuan relative.
2. tentukan faktor distribusi.
3. tentukan momen ujung terjepit (FEM).
4. tentukan besar momen kunci sebesar penjumlahan dikalikan negative (-)
5. tentukan momen seimbang.
6. tentukan momen CO (Carry Over) sebesar $\frac{1}{2}$ x momen seimbang pada ujung batang yang berseberangan (untuk batang prismatis).
7. tentukan momen kunci sebesar penjumlahan x negative (-)
8. tentukan momen seimbang.
9. lakukan beberapa siklus hingga mendapatkan nilai " CO " yang mendekati nol (0).
10. jumlahkan semua momen pada setiap siklus kecuali momen kunci.

a. Menentukan Faktor Kekakuan (Stiffness) dan Carry Over

Faktor Kekakuan

Kekakuan (*stiffness*) didefinisikan sebagai momen yang bekerja untuk menghasilkan rotasi sebesar 1 satuan unit rotasi (lihat gambar 5.3). *Stiffness* S_{AB} adalah besarnya momen M_a yang diperlukan untuk membuat putaran sudut $\theta_a = 1$. S_{AB} dapat diperoleh dengan menghitung besarnya putaran sudut di titik A akibat momen M_a dan M_b menggunakan *momen area method*.

$$\theta_{AB} = \frac{\Delta_{BA}}{L} = \frac{1}{L_1} \int_a^b \frac{M_x}{EI} \cdot (L - x) dx \quad (\text{Pers. 5.7})$$

$$\theta_{AB} = \frac{1}{L_1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \left(\frac{2L_1}{3} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \left(\frac{L_1}{3} \right) \right]$$

$$\theta_{AB} = \frac{2}{6} \cdot \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \quad (\text{Pers. 5.8})$$

Adapun putaran sudut di B dihitung sebagai berikut:

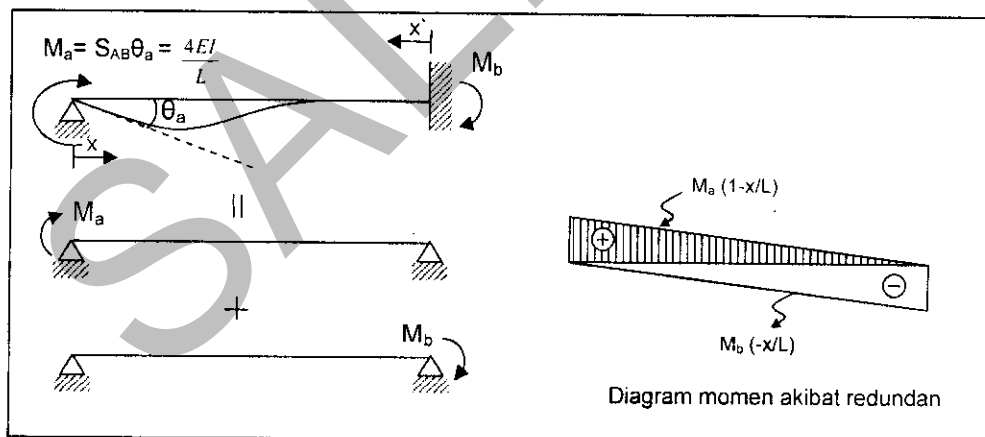
$$\theta_{BA} = \frac{\Delta_{AB}}{L} = \frac{1}{L_1} \cdot \int_a^b \frac{M_x}{EI} \cdot (x) \, dx \quad (\text{Pers. 5.9})$$

$$\theta_{BA} = \frac{1}{L_1} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{3} \right) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \cdot \left(\frac{2L_1}{3} \right) \right]$$

$$\theta_{BA} = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{M_a}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 + \frac{2}{6} \cdot \left(\frac{M_b}{E \cdot I_1} \right) \cdot L_1 \quad (\text{Pers. 5.10})$$

Batasan kondisi untuk struktur jepit sendi diatas adalah:

$\theta_a = 1$ dan $\theta_b = 0$.



Gambar 5.3 Faktor kekakuan dan Carry Over.

Dengan memasukkan kondisi $\theta_b = \theta_{BA} = 0$ dan $\theta_a = \theta_{AB} = 1$ kedalam persamaan 5.8 dan 5.10 diperoleh:

$$M_b = \frac{1}{2} M_a$$

(Pers 5.11)

$$M_a = \frac{4E \cdot I}{L} \cdot \theta_A = \frac{4E \cdot I}{L} \cdot (1) = S_{AB}$$

(Pers 5.12)

Faktor Carry Over

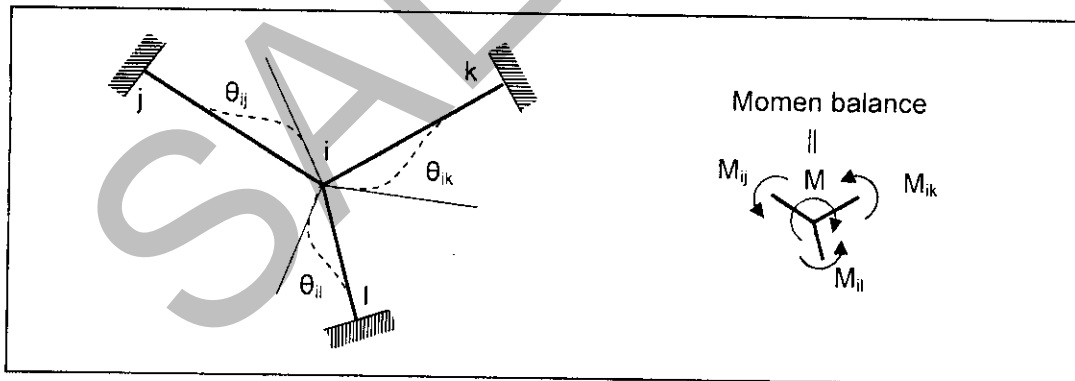
Pada saat titik A dikunci dan kemudian dilepaskan dengan memberikan momen M_a seperti terlihat pada gambar 5.3, titik B dalam keadaan jepit (terkunci). Pemberian momen M_a di titik ujung A pada member AB membuat terjadinya momen M_b di titik B yang perletakan jepit. Besarnya momen induksi di titik B, M_b untuk penampang prismatis adalah $\frac{1}{2}$ dari momen yang diaplikasikan M_a . (lihat pers. 5.11).

$$C_{AB} = \frac{M_b}{M_a} = \frac{1}{2}$$

(Pers. 5.13)

b. Menentukan Faktor Distribusi

Pada saat joint yang terkunci dilepaskan, joint tersebut akan berotasi untuk mencapai equilibrium. Besarnya rotasi proporsional dengan momen penyeimbang di titik itu. Momen penyeimbang ini didistribusikan secara proporsional dengan kekakuan masing-masing member yang bertemu di joint tersebut.

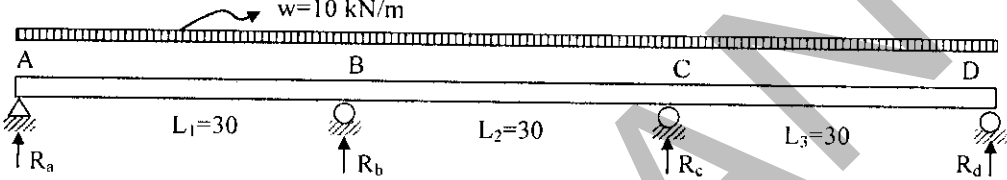


Gambar 5.4 Faktor Distribusi

Pada saat kunci di titik i dilepas, semua elemen yang bermuara ke titik i akan berotasi yang besarnya sama. $\theta_{ij} = \theta_{ik} = \theta_{il} = \theta_i$

$$\theta_i = \frac{M_{ij}}{S_{ij}} = \frac{M_{ik}}{S_{ik}} = \frac{M_{il}}{S_{il}}$$

$$M_{ij} + M_{ik} + M_{il} = M$$

CONTOH 5.2	Analisis Struktur Balok Menerus Metoda Distribusi Momen Cross	1 1
<p>SOAL : Ambil soal 5.1 kemudian hitung dengan metoda distribusi momen cross.</p>  <p>Konvensi : momen (+) searah jarum jam</p>		

$$M_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_{ij} + S_{ik} + S_{il}} \cdot M$$

(Pers. 5.14)

Contoh aplikasi perhitungan metoda distribusi momen cross dapat dilihat sebagai berikut:

1. Menentukan momen ujung jepit (FEM)

$$M_{FAB} := \frac{-w \cdot L_1^2}{12}$$

$$M_{FAB} = -750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FBC} := \frac{-w \cdot L_2^2}{12}$$

$$M_{FBC} = -750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FCD} := \frac{-w \cdot L_2^2}{12}$$

$$M_{FCD} = -750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FBA} := \frac{w \cdot L_1^2}{12}$$

$$M_{FBA} = 750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FCB} := \frac{w \cdot L_2^2}{12}$$

$$M_{FCB} = 750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{FDC} := \frac{w \cdot L_2^2}{12}$$

$$M_{FDC} = 750 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

2. Faktor distribusi (DF)

Ditentukan Modulus elastisitas beton, E_c . Dalam kasus $E_c = \text{konstan}$ atau Inersia $I = \text{konstan}$ maka E_c dan I dapat dihilangkan.

$$\text{Stiffness : } S_{ik} = \frac{4 \cdot E_c \cdot I_i}{L_i} = \frac{4 \cdot I_i}{L_i}$$

$$S_{AB} := \frac{4 \cdot I_1}{L_1} \quad S_{BA} := \frac{4 \cdot I_1}{L_1}$$

$$S_{AB} = 0.067 \cdot m^3 \quad S_{BA} = 0.067 \cdot m^3$$

$$S_{BC} := \frac{4 \cdot I_2}{L_2} \quad S_{CB} := \frac{4 \cdot I_2}{L_2}$$

$$S_{BC} = 0.067 \cdot m^3 \quad S_{CB} = 0.067 \cdot m^3$$

$$S_{CD} := \frac{4 \cdot I_3}{L_3} \quad S_{DC} := \frac{4 \cdot I_3}{L_3}$$

$$S_{CD} = 0.067 \cdot m^3 \quad S_{DC} = 0.067 \cdot m^3$$

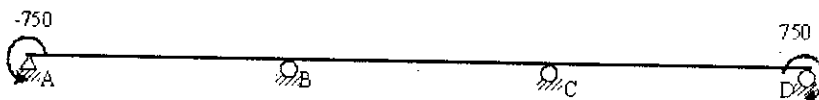
Faktor distribusi

$$DF_{AB} := \frac{S_{AB}}{S_{AB} + 0} \quad DF_{AB} = 1 \quad DF_{BA} := \frac{S_{BA}}{S_{BA} + S_{BC}} \quad DF_{BA} = 0.5$$

$$DF_{BC} := \frac{S_{BC}}{S_{BC} + S_{BA}} \quad DF_{BC} = 0.5 \quad DF_{CB} := \frac{S_{CB}}{S_{CB} + S_{CD}} \quad DF_{CB} = 0.5$$

$$DF_{CD} := \frac{S_{CD}}{S_{CD} + S_{CB}} \quad DF_{CD} = 0.5 \quad DF_{DC} := \frac{S_{DC}}{S_{DC} + 0} \quad DF_{DC} = 1$$

3. Menentukan momen titik untuk mengunci posisi. Jumlah momen ujung jepit (FEM) semua sisi di sebuah titik temu member adalah momen yang diperlukan untuk mengunci posisi di titik tersebut atau disebut juga momen unbalance. pada titik A -750 kNm (berlawanan putaran jam), di B 0.0 kNm, di C 0.0 kNm dan di D 750 kNm (searah putaran jam).



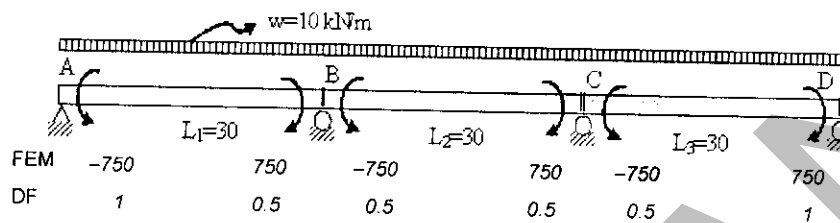
4. Distribusi Momen

Ketika titik A sebagai perletakan jepit dan akan diperhitungkan sebagai sendi bila titik B dibuka jepitannya, maka titik A harus dibuka jepitannya dan diseimbangkan terlebih dahulu. besar momen ujung jepit (FEM) akibat beban merata di titik A adalah -750 kNm. bertanda (-) karena berlawanan arah jarum jam. Momen FEM ini menimbulkan momen *unbalance* (MUB) = -750 kNm.

Momen ini harus diseimbangkan dengan cara mengalikan dengan minus faktor distribusi DF, $MBAL = MUB \cdot (-1) \cdot DF = 750 \text{ kNm}$. Ketika titik A diseimbangkan dengan MBAL, maka setengah momen balance (MBAL) harus dibagikan ke titik B sebagai momen carry over (MCO). selanjutnya MCO dipertimbangkan sebagai momen unbalance baru.



Tanda momen ujung positif



JOINT		A	B		C		D
Momen ujung		AB	BA	BC	CB	CD	DC
Siklus	DF	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
1	FEM	-750.00	750.00	-750.00	750.00	-750.00	750.00
	MUB	-750.00	0.00		0.00		750.00
	MBAL	750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-750.00
2	MCO	0.00	375.00	0.00	0.00	-375.00	0.00
	MUB	0.00	375.00		-375.00		0.00
	MBAL	0.00	-187.50	-187.50	187.50	187.50	0.00
3	MCO	-93.75	0.00	93.75	-93.75	0.00	93.75
	MUB	-93.75	93.75		-93.75		93.75
	MBAL	93.75	-46.88	-46.88	46.88	46.88	-93.75
4	MCO	-23.44	46.88	23.44	-23.44	-46.88	23.44
	MUB	-23.44	70.31		-70.31		23.44
	MBAL	23.44	-35.16	-35.16	35.16	35.16	-23.44
5	MCO	-17.58	11.72	17.58	-17.58	-11.72	17.58
	MUB	-17.58	29.30		-29.30		17.58
	MBAL	17.58	-14.65	-14.65	14.65	14.65	-17.58
6	MCO	-7.32	8.79	7.32	-7.32	-8.79	7.32
	MUB	-7.32	16.11		-16.11		7.32
	MBAL	7.32	-8.06	-8.06	8.06	8.06	-7.32
7	MCO	-4.03	3.66	4.03	-4.03	-3.66	4.03
	MUB	-4.03	7.69		-7.69		4.03
	MBAL	4.03	-3.85	-3.85	3.85	3.85	-4.03
8	MCO	-1.92	2.01	1.92	-1.92	-2.01	1.92
	MUB	-1.92	3.94		-3.94		1.92
	MBAL	1.92	-1.97	-1.97	1.97	1.97	-1.92
JUMLAH		0.00	900.01	-900.01	900.01	-900.01	0.00

5. Menggambar Diagram Momen dan Geser

Setelah mendapat momen ujung tahapan selanjutnya sama seperti pada solusi contoh 5.1 langkah (3) mencari reaksi perletakan dan (4) mencari gaya-gaya dalam maksimum. Diagram gaya dalam dapat dibuat setelah semua gaya dalam momen dan geser diperoleh.

5.3.5 *Penampang Non Prismatic*

Analisis struktur balok menerus dengan penampang non-prismatis (penampang tidak konstan) dapat diselesaikan secara manual dengan metoda distribusi momen.

Penentuan momen jepit ujung, faktor distribusi, dan faktor carry over yang biasa digunakan pada properti penampang konstan tidak berlaku lagi pada penampang non-prismatis, namun semua parameter di atas dapat diperoleh melalui prinsip yang sama yaitu persamaan kesetimbangan dan momen area method.

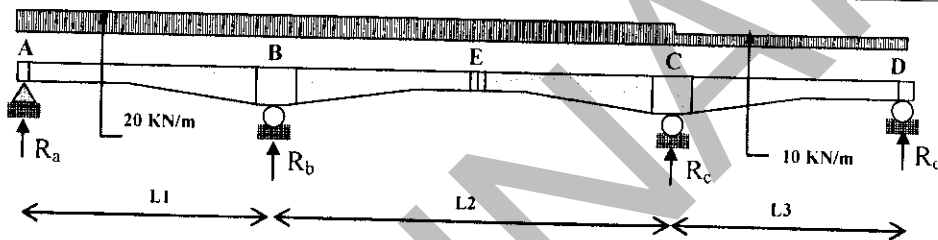
Perhitungan penampang non-prismatis dapat dilihat pada contoh berikut ini:

CONTOH 5.3

Analisis Struktur Balok Menerus
Penampang Non-Prismatis

1
1

SOAL : Hitung dan gambarkan diagram momen pada struktur dengan EI tidak konstan di bawah ini. Gunakan metoda Cross.



$$L_1 := 10m \quad L_2 := 16m \quad L_3 := 10m$$

$$w1 := 20 \frac{kN}{m} \quad w2 := 10 \frac{kN}{m}$$

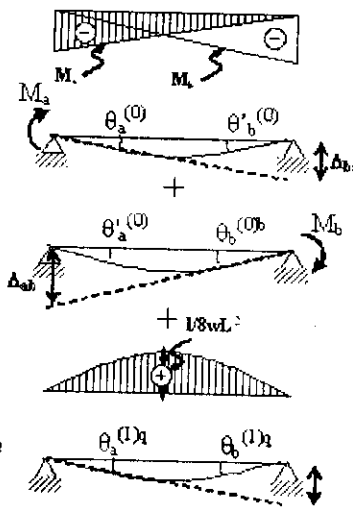
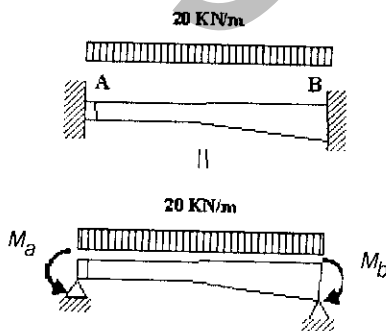
1. Menentukan momen ujung jepit (FEM)

Boundary

$$\theta_a := 0 \quad \theta_b := 0$$

Panjang bentang $L := 10$

FEM pada bentang A-B



Keterangan :

θ_{ab} : Jumlah perubahan putaran sudut total antara titik A dan B. Jumlah putaran sudut ini diperoleh dengan cara menghitung luas daerah dalam kurva M/EI antara A dan B.

$\Delta_{ba}^{(0)}$: Lendutan di titik B sehubungan adanya garis tangen putaran sudut di titik A akibat momen redundan M_a dan M_b .

Lendutan ini diperoleh dengan menghitung statis momen dari luas daerah dalam kurva M/EI akibat momen redundan M_a dan M_b antara A dan B dikali jarak pusat daerah dalam kurva M/EI terhadap titik B akibat momen M_a dan M_b .

Momen akibat beban merata w_1 sepanjang bentang L_1

$$M_q(x) = \frac{w_1 \cdot x}{2} \cdot (L - x)$$

Modulus elastisitas bahan, E

Momen inersia balok lurus, $I_0 := 1$

Momen inersia daerah pembesaran (*haunch*),

$$I_{ab}(x) := \begin{cases} I_0 & \text{if } 0 \leq x < 5 \\ \left[I_0 \cdot \left(\frac{x}{5} \right)^3 \right] & \text{if } 5 < x \leq 10 \end{cases}$$

Persamaan putaran sudut pada ujung-ujung member dimana kedua ujungnya jepit.

$$\Theta_{ab} = \frac{\Delta_{ba}^{(0)} - \Delta_{ba}^{(1)}}{L} = \theta_a = 0$$

$$\Theta_{ba} = \frac{\Delta_{ab}^{(0)} - \Delta_{ab}^{(1)}}{L} = \theta_b = 0$$

Dari persamaan putaran sudut di atas dapat dikembangkan persamaan berikut:

$$\theta_a = \left[\int_0^L \frac{Ma \cdot \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^L \frac{Mb \cdot \left(-\frac{x}{L} \right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx - \int_0^L \frac{\frac{w_1 \cdot x}{2} \cdot (L - x)^2}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\theta_b = \left[\int_0^L \frac{Ma \cdot \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^L \frac{Mb \cdot \left(-\frac{x}{L} \right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx - \int_0^L \frac{\frac{w_1 \cdot x}{2} \cdot (L - x) \cdot x}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

Untuk menghitung integrasi di atas akan digunakan cara Simpson.
Rumus Integrasi numerik Simpson :

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{S}{3} \cdot (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \dots + 2f_{m-2} + 4f_{m-1} + f_m)$$

$\Delta_{ba}^{(1)}$: Lendutan di titik B sehubungan adanya garis tangen putaran sudut di titik A akibat momen M_q . Lendutan ini diperoleh dengan menghitung statis momen dari luas daerah dalam kurva M/EI akibat M_q antara A dan B dikali jarak pusat daerah dalam kurva M/EI terhadap titik B.

Δ_{ab} : Lendutan di titik A akibat adanya garis tangen putaran sudut di titik B. Lendutan ini diperoleh dengan menghitung statis momen dari luas daerah dalam kurva M/EI antara A dan B dengan jarak pusat daerah dalam kurva M/EI terhadap titik A.

θ_a : Putaran sudut di titik A.

θ_b : Putaran sudut di titik B.

$A1(x) := \frac{\left(\frac{x}{L} - 1\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)}$	$A2(x) := \frac{\left(\frac{x}{L} - 1\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)}$	
$B1(x) := \frac{\left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)}$	$B2(x) := \frac{\left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)}$	
$C1(x) := \frac{\frac{w1 \cdot x}{2} \cdot (L - x)^2}{E \cdot I_{ab}(x)}$	$C2(x) := \frac{\frac{w1 \cdot x}{2} \cdot (L - x) \cdot x}{E \cdot I_{ab}(x)}$	

Menghitung :

$$\int_0^L A1(x) dx = -31.581$$

L = 10
Range = 10
Jumlah interval = 20
s = 0.5

Point (i)	x_i	$l(x)$	$M(x)$	f_i $=M(x)/l(x)$	$4f_i$ (ganjil)	$2f_i$ (genap)
0	0.000	1.000	-10.000	-10.000000		
1	0.500	1.000	-9.025	-9.025000	-36.1000	
2	1.000	1.000	-8.100	-8.100000		-16.2000
3	1.500	1.000	-7.225	-7.225000	-28.9000	
4	2.000	1.000	-6.400	-6.400000		-12.8000
5	2.500	1.000	-5.625	-5.625000	-22.5000	
6	3.000	1.000	-4.900	-4.900000		-9.8000
7	3.500	1.000	-4.225	-4.225000	-16.9000	
8	4.000	1.000	-3.600	-3.600000		-7.2000
9	4.500	1.000	-3.025	-3.025000	-12.1000	
10	5.000	1.000	-2.500	-2.500000		-5.0000
11	5.500	1.331	-2.025	-1.521412	-6.0856	
12	6.000	1.728	-1.600	-0.925926		-1.8519
13	6.500	2.197	-1.225	-0.557579	-2.2303	
14	7.000	2.744	-0.900	-0.327988		-0.6560
15	7.500	3.375	-0.625	-0.185185	-0.7407	
16	8.000	4.096	-0.400	-0.097656		-0.1953
17	8.500	4.913	-0.225	-0.045797	-0.1832	
18	9.000	5.832	-0.100	-0.017147		-0.0343
19	9.500	6.859	-0.025	-0.003645	-0.0146	
20	10.000	8.000	0.000	0.000000		
Total					-125.7545	-53.7374

Result: $= 0.50/3 * (-10.0000 + -125.7545 + -53.7374 + 0.0000) = -31.58198$

Menghitung :

$$\int_0^L B1(x) dx = -12.169$$

L = 10
Range = 10
Jumlah interval = 20
s = 0.5

Point (i)	x_i	$l(x)$	$M(x)$	f_i $=M(x)/l(x)$	$4f_i$ (ganjil)	$2f_i$ (genap)
0	0.000	1.000	0.000	0.000000		
1	0.500	1.000	-0.475	-0.475000	-1.9000	
2	1.000	1.000	-0.900	-0.900000		-1.8000
3	1.500	1.000	-1.275	-1.275000	-5.1000	
4	2.000	1.000	-1.600	-1.600000		-3.2000
5	2.500	1.000	-1.875	-1.875000	-7.5000	
6	3.000	1.000	-2.100	-2.100000		-4.2000
7	3.500	1.000	-2.275	-2.275000	-9.1000	
8	4.000	1.000	-2.400	-2.400000		-4.8000
9	4.500	1.000	-2.475	-2.475000	-9.9000	
10	5.000	1.000	-2.500	-2.500000		-5.0000
11	5.500	1.331	-2.475	-1.859504	-7.4380	
12	6.000	1.728	-2.400	-1.388889		-2.7778
13	6.500	2.197	-2.275	-1.035503	-4.1420	
14	7.000	2.744	-2.100	-0.765306		-1.5306
15	7.500	3.375	-1.875	-0.555556	-2.2222	
16	8.000	4.096	-1.600	-0.390625		-0.7813
17	8.500	4.913	-1.275	-0.259516	-1.0381	
18	9.000	5.832	-0.900	-0.154321		-0.3086
19	9.500	6.859	-0.475	-0.069252	-0.2770	
20	10.000	8.000	0.000	0.000000		
Total					-48.6173	-24.3983

Result: $= 0.50/3 \cdot (0.0000 + -48.6173 + -24.3983 + 0.0000) = -12.16927$

Menghitung :

$$\int_0^L C1(x) dx$$

L = 10
Range = 10
Jumlah interval = 20
s = 0.5

Point (i)	x_i	$l(x)$	$M(x)$	f_i $=M(x)/l(x)$	$4f_i$ (ganjil)	$2f_i$ (genap)
0	0.000	1.000	0.000	0.000000		
1	0.500	1.000	451.250	451.250000	1805.0000	
2	1.000	1.000	810.000	810.000000		1620.0000
3	1.500	1.000	1083.750	1083.750000	4335.0000	
4	2.000	1.000	1280.000	1280.000000		2560.0000
5	2.500	1.000	1406.250	1406.250000	5625.0000	
6	3.000	1.000	1470.000	1470.000000		2940.0000
7	3.500	1.000	1478.750	1478.750000	5915.0000	
8	4.000	1.000	1440.000	1440.000000		2880.0000
9	4.500	1.000	1361.250	1361.250000	5445.0000	
10	5.000	1.000	1250.000	1250.000000		2500.0000
11	5.500	1.331	1113.750	836.776860	3347.1074	
12	6.000	1.728	960.000	555.555556		1111.1111
13	6.500	2.197	796.250	362.426036	1449.7041	
14	7.000	2.744	630.000	229.591837		459.1837
15	7.500	3.375	468.750	138.888889	555.5556	
16	8.000	4.096	320.000	78.125000		156.2500
17	8.500	4.913	191.250	38.927336	155.7093	
18	9.000	5.832	90.000	15.432099		30.8642
19	9.500	6.859	23.750	3.462604	13.8504	
20	10.000	8.000	0.000	0.000000		
Total					28646.9269	14257.4090

Result: $= 0.50/3 \cdot (0.0000 + 28646.9269 + 14257.4090 + 0.0000) = 7150.72265$

Demikian pula dengan cara yang sama digunakan untuk menghitung :

$$\int_0^L A2(x) dx = -12.169$$

$$\int_0^L B2(x) dx = -12.831$$

$$\int_0^L C2(x) dx = 5018.506$$

Selanjutnya setelah semua integrasi diatas diperoleh, maka persamaan momen jepit diatas dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$\theta_a = 0 \quad \theta_b = 0$$

$$M_a := 1 \quad M_b := 1$$

Given

$$\theta_a = M_a \cdot (-31.581) + M_b \cdot (-12.169) - 7150.722$$

$$\theta_b = M_a \cdot (-12.169) + M_b \cdot (-12.831) - 5018.506$$

$$\begin{pmatrix} MF_{ab} \\ MF_{ba} \end{pmatrix} := \text{Find}(M_a, M_b) \quad \begin{pmatrix} MF_{ab} \\ MF_{ba} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -119.319 \\ -277.96 \end{pmatrix}$$

FEM pada bentang B-C

Boundary

$$\theta_b := 0 \quad \theta_c := 0$$

$$\text{Panjang bentang} \quad L := 16$$

Momen sepanjang bentang L_2

$$M_{bx}(x) = M_b \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad M_{cx}(x) = M_c \cdot \left(\frac{x}{L}\right)$$

Momen inersia balok lurus,
 $I_o := 1$

Momen inersia daerah pembesaran (haunch),

$$I_{bc}(x) := \begin{cases} I_o \cdot \left(2 - \frac{x}{5}\right)^3 & \text{if } 0 \leq x \leq 5 \\ I_o & \text{if } 5 < x \leq 11 \\ I_o \cdot \left(\frac{x-6}{5}\right)^3 & \text{if } 11 < x \leq 16 \end{cases}$$

Persamaan putaran sudut pada ujung-ujung member.

$$\theta_{bc} = \frac{\Delta_{cb}^{(0)} - \Delta_{cb}^{(1)}}{L} = \theta_b = 0$$

$$\theta_{cb} = \frac{\Delta_{bc}^{(0)} - \Delta_{bc}^{(1)}}{L} = \theta_c = 0$$

Dari persamaan putaran sudut di atas dapat dikembangkan persamaan berikut:

Dalam hal ini I_o dapat diambil sebesar 1 satuan untuk mempermudah perhitungan, karena akan saling meniadakan.

$$\theta_b = \left[\int_0^L \frac{Mb \cdot \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx + \int_0^L \frac{Mc \cdot \left(-\frac{x}{L} \right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx - \int_0^L \frac{\frac{w \cdot x}{2} \cdot (L - x)^2}{E \cdot I_{bc}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\theta_c = \left[\int_0^L \frac{Mb \cdot \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \cdot (x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx + \int_0^L \frac{Mc \cdot \left(-\frac{x}{L} \right) \cdot (x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx - \int_0^L \frac{\frac{w \cdot x}{2} \cdot (L - x) \cdot x}{E \cdot I_{bc}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\begin{pmatrix} MF_{bc} \\ MF_{cb} \end{pmatrix} := \text{Find}(Mb, Mc) \quad \begin{pmatrix} MF_{bc} \\ MF_{cb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -530.988 \\ -530.988 \end{pmatrix}$$

Momen Jepit di ujung-ujung member (FEM) menjadi sebagai berikut:

$$M_{FAB} := MF_{ab}$$

$$M_{FBA} := MF_{ba}$$

$$M_{FAB} = -119.31928$$

$$M_{FBA} = -277.96039$$

$$M_{FBC} := MF_{bc}$$

$$M_{FCB} := MF_{cb}$$

$$M_{FBC} = -530.988$$

$$M_{FCB} = -530.9879$$

$$M_{FCD} := MF_{ba}$$

$$M_{FDC} := MF_{ab}$$

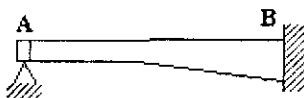
$$M_{FCD} = -277.96$$

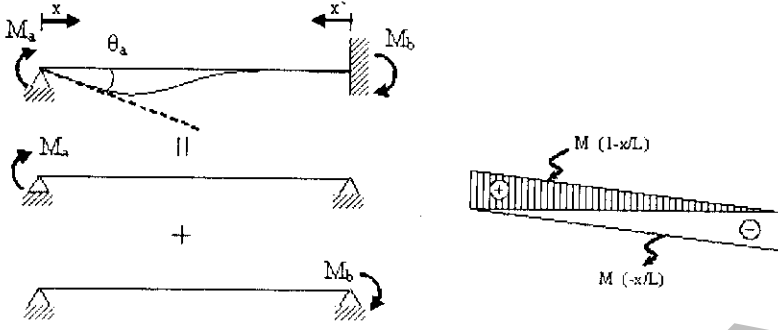
$$M_{FDC} = -119.319$$

2. Faktor distribusi (DF) dan Carry Over

Ditentukan Modulus elastisitas beton, E_c . Dalam kasus E_c =konstan atau Inersia I =konstan maka E_c dan I dapat dihilangkan, namun tidak demikian bila penampang non prismatic.

Tinjau bentang AB





Menentukan stiffness S_{ab}

Faktor kekakuan (*stiffness*) S_{ab} diperoleh dengan memberikan putaran sudut di titik yang berputar satu satuan, $\theta_a = 1$ sementara titik B dikunci.

Boundary
 $\theta_a := 1 \quad \theta_b := 0 \quad L := 10$

$$M_{ax}(x) = M_a \left(1 - \frac{x}{L} \right) \quad M_{bx}(x) = M_b \left(-\frac{x}{L} \right)$$

$I_o := 1 \quad E := 1$

$$I_{ab}(x) := \begin{cases} I_o & \text{if } 0 \leq x < 5 \\ \left[I_o \left(\frac{x}{5} \right)^3 \right] & \text{if } 5 < x \leq 10 \end{cases}$$

Persamaan putaran sudut di titik A pada bentang AB

$$\theta_{ab} = \frac{\Delta_{ba}}{L} = 1 \quad \theta_{ba} = \frac{\Delta_{ab}}{L} = 0$$

$M_a := 1 \quad M_b := 1$

Given

$\theta_a = \left[\int_0^{10} \frac{Ma \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^{10} \frac{Mb \cdot \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$ $\theta_b = \left[\int_0^{10} \frac{Ma \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^{10} \frac{Mb \cdot \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$ $\begin{pmatrix} Ma \\ Mb \end{pmatrix} := \text{Find}(Ma, Mb) \quad \begin{pmatrix} Ma \\ Mb \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.499 \\ 0.473 \end{pmatrix}$ $\frac{Mb}{Ma} = 0.9484 \quad \text{carry over}$ $S_{AB} := Ma \times EI \text{ [MPa m}^3\text{]} \quad \text{faktor kekakuan stiffness}$ $S_{AB} = 0.499 \times EI \text{ [MPa m}^3\text{]}$	
<p>Menentukan stiffness S_{ba}</p> <p>Faktor kekakuan (<i>stiffness</i>) S_{bc} diperoleh dengan memberikan putaran sudut titik yang berputar satu satuan searah jarum jam, $\theta_b = 1$ (atau $\theta_b = -1$ untuk putaran yang berlawanan arah jarum jam) sementara titik A dikunci.</p> <p><i>Boundary</i></p> $\theta_b := -1 \quad \theta_a := 0 \quad L := 10$ $Max(x) = Ma \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad Mbx(x) = Mb \cdot \left(-\frac{x}{L}\right)$ $I_0 := 1$ $I_{ab}(x) := \begin{cases} I_0 & \text{if } 0 \leq x < 5 \\ \left[I_0 \cdot \left(\frac{x}{5}\right)^3 \right] & \text{if } 5 < x \leq 10 \end{cases}$	

Persamaan putaran sudut di titik B pada bentang AB

$$\theta_{ba} = \frac{\Delta_{ab}}{L} = 1 \quad \theta_{ab} = \frac{\Delta_{ba}}{L} = 0$$

$$M_a := 1 \quad M_b := 1$$

Given

$$\theta_a = \left[\int_0^L \frac{M_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^L \frac{M_b \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\theta_b = \left[\int_0^L \frac{M_a \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx + \int_0^L \frac{M_b \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{ab}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\begin{pmatrix} M_a \\ M_b \end{pmatrix} := \text{Find}(M_a, M_b) \quad \begin{pmatrix} M_a \\ M_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.473 \\ 1.228 \end{pmatrix}$$

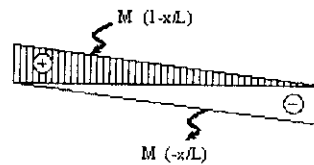
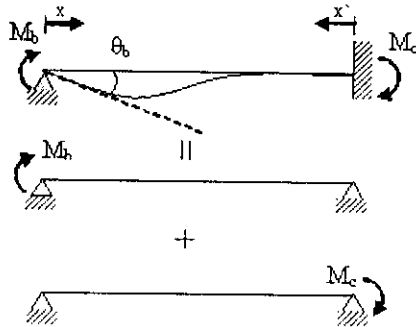
$$\frac{M_a}{M_b} = 0.3853 \quad \text{carry over}$$

$$S_{BA} := M_b \times E I_o \text{ [MPa m}^3\text{]} \quad \text{faktor kekakuan stiffness}$$

$$S_{BA} = 1.228 \times E I_o \text{ [MPa m}^3\text{]}$$

Tinjau bentang BC





Menentukan stiffness S_{bc}

Faktor kekakuan (*stiffness*) S_{bc} diperoleh dengan memberikan putaran sudut di titik yang berputar satu satuan searah jarum jam, $\theta_b = 1$ (atau $\theta_b = -1$ untuk putaran yang berlawanan arah jarum jam) sementara di titik C dikunci.

Boundary

$$\theta_b := 1$$

$$\theta_c := 0$$

$$L := 16$$

$$M_b(x) = M_b \left(1 - \frac{x}{L} \right)$$

$$M_c(x) = M_c \left(-\frac{x}{L} \right)$$

$$I_o := 1$$

$$I_{bc}(x) := \begin{cases} I_o \left(2 - \frac{x}{5} \right)^3 & \text{if } 0 \leq x \leq 5 \\ I_o & \text{if } 5 < x \leq 11 \\ I_o \left(\frac{x-6}{5} \right)^3 & \text{if } 11 < x \leq 16 \end{cases}$$

Persamaan putaran sudut di titik B pada bentang BC

$$\theta_{bc} = \frac{\Delta_{cb}}{L} = 1 \quad \theta_{cb} = \frac{\Delta_{bc}}{L} = 0$$

$$M_b := 1$$

$$M_c := 1$$

Given

$$\theta_b = \left[\int_0^L \frac{M_b \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx + \int_0^L \frac{M_c \cdot \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (L - x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\theta_c = \left[\int_0^L \frac{M_b \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx + \int_0^L \frac{M_c \cdot \left(-\frac{x}{L}\right) \cdot (x)}{E \cdot I_{bc}(x)} dx \right] \cdot \frac{1}{L}$$

$$\begin{pmatrix} M_b \\ M_c \end{pmatrix} := \text{Find}(M_b, M_c)$$

$$\begin{pmatrix} M_b \\ M_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.705 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

$$\frac{M_c}{M_b} = 0.7089 \quad \text{Carry Over (CO)}$$

$$S_{BC} := M_b \times EI \text{ [MPa m}^3\text{]} \quad \text{faktor kekakuan stiffness}$$

$$S_{BC} = 0.7047 \times EI \text{ [MPa m}^3\text{]}$$

Faktor kekakuan tiap member dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_{CB} := S_{BC} \quad S_{CB} = 0.7047$$

$$S_{CD} := S_{BA} \quad S_{CD} = 1.228$$

$$S_{DC} := S_{AB}$$

Faktor distribusi

$$DF_{AB} := \frac{S_{AB}}{S_{AB} + 0} \quad DF_{AB} = 1 \quad DF_{BA} := \frac{S_{BA}}{S_{BA} + S_{BC}} \quad DF_{BA} = 0.6354$$

$$DF_{BC} := \frac{S_{BC}}{S_{BC} + S_{BA}} \quad DF_{BC} = 0.3646 \quad DF_{CB} := \frac{S_{CB}}{S_{CB} + S_{CD}} \quad DF_{CB} = 0.3646$$

$$DF_{CD} := \frac{S_{CD}}{S_{CD} + S_{CB}} \quad DF_{CD} = 0.6354 \quad DF_{DC} := \frac{S_{DC}}{S_{DC} + 0} \quad DF_{DC} = 1$$

3. Menentukan momen titik untuk mengunci posisi. Jumlah momen ujung jepit (FEM) semua sisi di sebuah titik temu member adalah momen yang diperlukan untuk mengunci posisi di titik tersebut atau disebut juga momen unbalance. pada titik A -119.31 kNm, di B -253.02 kNm (berlawanan putaran jam), di C 392.0 kNm dan di D 59.65 kNm (searah putaran jam).

4. Distribusi Momen

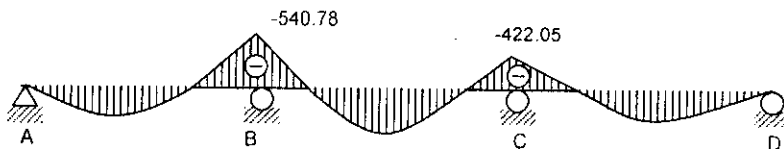
Ketika titik A sebagai perletakan jepit dan akan diperhitungkan sebagai sendi bila titik B dibuka jepitannya, maka titik A harus dibuka jepitannya dan diseimbangkan terlebih dahulu. besar momen ujung jepit (FEM) akibat beban merata di titik A adalah -119.319 kNm. bertanda (-) karena berlawanan arah jarum jam. Momen FEM ini menimbulkan momen *unbalance* (MUB) = -119.319 kNm. Momen ini harus diseimbangkan dengan cara mengalikan dengan minus faktor distribusi DF, MBAL=MUB*(-1)*DF=119.319 kNm. Ketika titik A diseimbangkan dengan MBAL, maka sebagian momen balance (MBAL) harus dibagikan ke titik B sebagai momen carry over (MCO). selanjutnya MCO dipertimbangkan sebagai momen unbalance baru.

Tanda momen ujung positif

FEM	-119.31	277.97 -253.02	(-530.99)	530.99 392.00	-138.99	59.65
DF	1	0.635	0.365	0.365	0.635	1
CO	0.948	0.385	0.709	0.709	0.385	0.948

JOINT		A	B		C		D
Momen ujung		AB	BA	BC	CB	CD	DC
Siklus	CO	0.9484	0.3853	0.7089	0.7089	0.3853	0.9484
	DF	1.000	0.635	0.365	0.365	0.635	1.000
1	FEM	-119.31	277.97	-530.99	530.99	-138.99	59.65
	MUB	-119.31	-253.02		392.00		59.65
	MBAL	119.31	160.77	92.25	-142.92	-249.08	-59.65
2	MCO	61.94	113.15	-101.32	65.40	-56.58	-95.97
	MUB	61.94	11.83		8.82		-95.97
	MBAL	-61.94	-7.52	-4.31	-3.22	-5.60	95.97
3	MCO	-2.90	-58.75	-2.28	-3.06	91.02	-2.16
	MUB	-2.90	-61.03		87.96		-2.16
	MBAL	2.90	38.78	22.25	-32.07	-55.89	2.16
4	MCO	14.94	2.75	-22.73	15.77	2.05	-21.53
	MUB	14.94	-19.99		17.82		-21.53
	MBAL	-14.94	12.70	7.29	-6.50	-11.32	21.53
5	MCO	4.89	-14.17	-4.61	5.17	20.42	-4.36
	MUB	4.89	-18.78		25.59		-4.36
	MBAL	-4.89	11.93	6.85	-9.33	-16.26	4.36
6	MCO	4.60	-4.64	-6.61	4.85	4.14	-6.26
	MUB	4.60	-11.25		8.99		-6.26
	MBAL	-4.60	7.15	4.10	-3.28	-5.71	6.26
7	MCO	2.76	-4.36	-2.32	2.91	5.94	-2.20
	MUB	2.76	-6.68		8.85		-2.20
	MBAL	-2.76	4.25	2.44	-3.23	-5.62	2.20
8	MCO	1.64	-2.61	-2.29	1.73	2.09	-2.17
	MUB	1.64	-4.90		3.81		-2.17
	MBAL	-1.64	3.11	1.79	-1.39	-2.42	2.17
9	MCO	1.20	-1.55	-0.99	1.27	2.05	-0.93
	MUB	1.20	-2.54		3.32		-0.93
	MBAL	-1.20	1.61	0.93	-1.21	-2.11	0.93
10	MCO	0.62	-1.14	-0.86	0.66	0.89	-0.81
	MUB	0.62	-2.00		1.54		-0.81
	MBAL	-0.62	1.27	0.73	-0.56	-0.98	0.81
11	MCO	0.49	-0.59	-0.40	0.52	0.77	-0.38
	MUB	0.49	-0.99		1.29		-0.38
	MBAL	-0.49	0.63	0.36	-0.47	-0.82	0.38
12	MCO	0.24	-0.46	-0.33	0.26	0.36	-0.32
	MUB	0.24	-0.80		0.61		-0.32
	MBAL	-0.24	0.51	0.29	-0.22	-0.39	0.32
JUMLAH		0.00	540.78	-540.78	422.05	-422.05	0.00

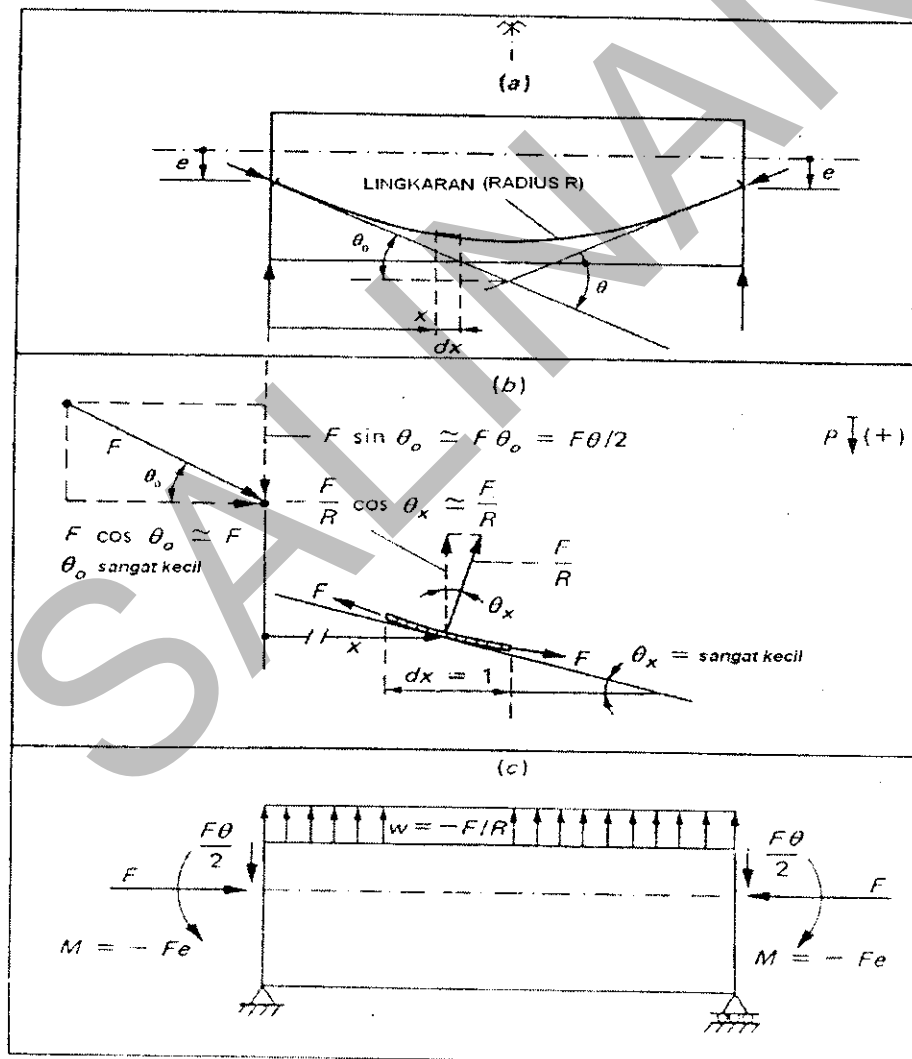
Diagram Momen



SALINAN

5.3.6 Konsep Beban Ekuivalen

Kabel prategang yang bekerja pada balok dapat digantikan dengan beban ekuivalen. Beban ekuivalen ini terdiri dari gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen pada perletakan, gaya transversal sepanjang profil tendon. Gaya transversal diperoleh dari kelengkungan (*curvature*) atau perubahan pada profil tendon. Untuk tendon melengkung, besarnya beban transversal per unit panjang adalah P/p_x , dimana p_x adalah radius kelengkungan pada potongan yang ditinjau.



Gambar 5-3 Konsep beban ekuivalen (a) Profil tendon. (b) Beban transversal akibat prategang. (c) Free body balok

PROFIL KABEL PRATEGANG	BEBAN LUAR EKIVALEN
	<p>Profil kabel parabolik :</p> $w = -\frac{F\theta}{l} = -\frac{8F\delta}{l^2}$ <p>Profil kabel lingkaran :</p> $w = -\frac{F\theta}{l} = -\frac{F}{R}$ <p>(w ↓ +)</p>
	<p>$P = -F\theta = -4F\frac{\delta}{l}$ (radian)</p> <p>(P ↓ +)</p>
	$w = -\frac{F\theta}{l} = -\frac{2F\delta}{l^2}$ <p>(w ↓ +)</p>
	<p>$M = -Fe$</p>

Gambar 5-4 Rumusan beban ekuivalen untuk profil tendon tipikal pada balok.

Aplikasi perhitungan beban ekuivalen dapat dilihat pada contoh praktis berikut ini:

Soal 5.4 Hitung beban ekuivalen untuk profil kabel sebagai berikut:

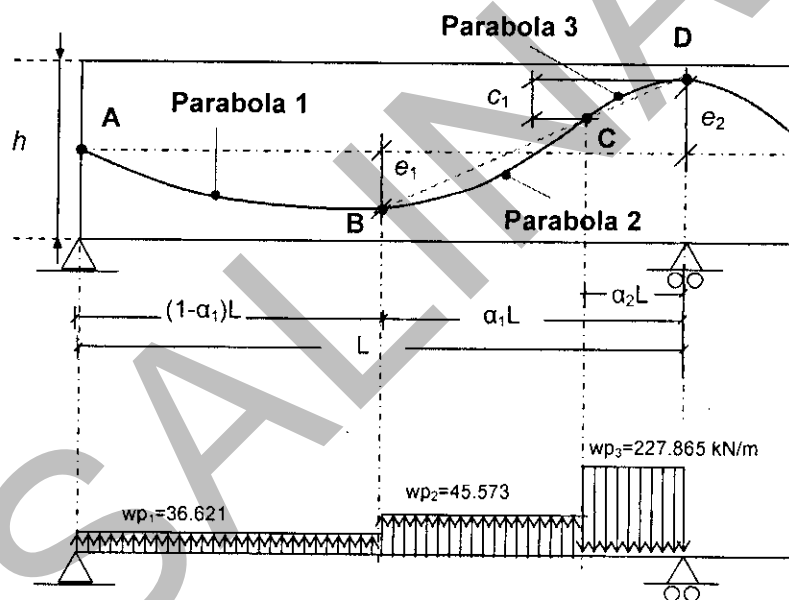
Diketahui :

Gaya prategang $F := 2500 \text{ kN}$

Panjang bentang $L := 16 \text{ m}$ $\alpha_1 := 0.6$ $\alpha_2 := 0.1$

Eksentrisitas $e_1 := 300 \text{ mm}$ $e_2 := 400 \text{ mm}$

Tinggi parabola 3 $c_1 := \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot (e_1 + e_2)$ $c_1 = 0.117 \text{ m}$



Parabola 1

Total Perubahan sudut kelengkungan :

$$L' := (1 - \alpha_1)L$$

$$\theta_1 := \frac{2 \cdot e_1}{L'} \quad \theta_1 = 0.094$$

Beban merata ekivalen :

$$wp_1 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_1}{L'}$$

$$wp_1 := \frac{F \cdot \theta_1}{L'} \quad wp_1 = 36.621 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\uparrow)$$

Parabola 2

Total Perubahan sudut kelengkungan :

$$L' := \alpha_1 L - \alpha_2 \cdot L$$

$$\theta_2 := \frac{2 \cdot (e_1 + e_2 - c_1)}{L'} \quad \theta_2 = 0.146$$

Beban merata ekivalen :

$$wp_2 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_2}{L'}$$

$$wp_2 := \frac{F \cdot \theta_2}{L'} \quad wp_2 = 45.573 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\uparrow)$$

Parabola 3

Total Perubahan sudut kelengkungan :

$$L' := \alpha_2 \cdot L$$

$$\theta_3 := \theta_2 \qquad \theta_3 = 0.146 \qquad \text{atau}$$

$$\theta_3 := \frac{2 \cdot (e_1 + e_2)}{\alpha_1 \cdot L} \qquad \theta_3 = 0.146$$

Beban merata ekivalen :

$$wp_3 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_3}{L'}$$

$$wp_3 := \frac{F \cdot \theta_3}{L'} \qquad wp_3 = 227.865 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\downarrow)$$

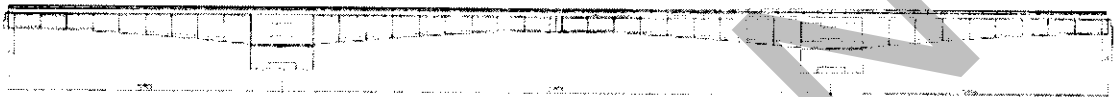
CONTOH 5.5

Analisis Lentur Balok Box-Girder

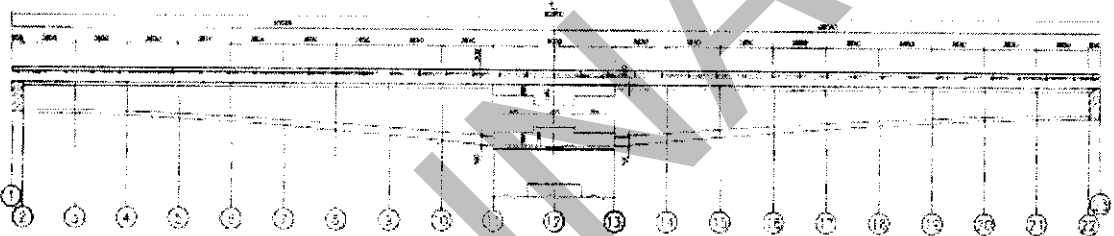
1

1

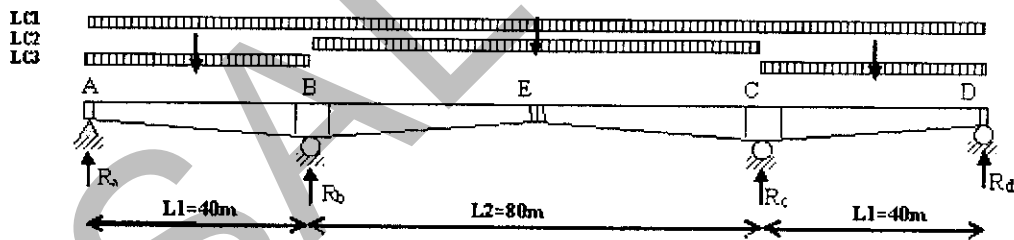
SOAL : Analisis tegangan lentur pada struktur box-girder menerus berikut ini.



Balok Simetris



Kombinasi beban hidup yang diperhitungkan



Diketahui :

Beban

Asumsi beban lalu lintas, $w_{LL} = 8 \text{ kN/m}^2$ total 100% selebar jalan 5.5m selebihnya 50%

$$w_{LL} := 8 \cdot 5.5 + 4 \cdot 3 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_{LL} = 56 \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Asumsi beban lalu lintas terpusat, $P_{LL} = 44 \text{ kN/m}$ total 100% selebar jalan 5.5m selebihnya 50%

$$P_{LL} := (44 \cdot 5.5 + 22 \cdot 3) \cdot 1.4 \quad P_{LL} = 431.2 \text{ kN}$$

Material

Mutu beton $f_c' := 37 \text{ MPa}$

Mutu strand $f_{pu} := 1860 \text{ MPa}$ (ASTM A416 270 K)

Diameter strand 12.5 mm (0.5 inc)

Luas strand $A_{ps1} := 100 \text{ mm}^2$

Jumlah strand per tendon $n_{st} := 12$

Jumlah tendon $n_t := 2 \cdot 12 \quad n_t = 24$

Jumlah strand total $n_{ps} := n_{st} \cdot n_t \quad n_{ps} = 288$

Asumsi tegangan efektif $f_{pe} := 0.4 \cdot f_{pu} \quad f_{pe} = 744 \text{ MPa}$

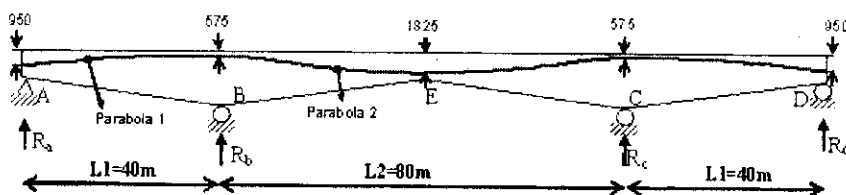
Gaya prategang $F := f_{pe} \cdot n_{ps} \cdot A_{ps1} \quad F = 21427.2 \text{ kN}$

Panjang bentang $L := 40 + 80 + 40$

Eksentrisitas $e_1 := (950 - 575) \text{ mm} \quad e_2 := 1825 \text{ mm}$
 $e_1 = 0.375 \text{ m}$

1. Menentukan Beban Ekuivalen

Menentukan center gravitasi kabel (cgs) untuk mendapatkan layout kabel gabungan.



Menentukan besarnya beban merata ekuivalen.

Struktur ini dapat dimodelkan sebagai sendi di ujung kiri dan rol pada perletakan lainnya. Pada contoh sebelumnya telah diberikan perhitungan dengan analisis struktur secara manual metoda cross dan 3-momen, namun pada contoh ini akan dihitung dengan software sejenis SAP2000 atau MIDAS.

Parabola 1

Total Perubahan sudut kelengkungan :

$$L' := 40m$$

$$\theta_1 := \frac{2 \cdot e_1}{L'} \quad \theta_1 = 0.019$$

Beban merata ekuivalen :

$$wp_1 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_1}{L'}$$

$$wp_1 := \frac{F \cdot \theta_1}{L'} \quad wp_1 = 10.044 \cdot \frac{kN}{m} \quad (\downarrow)$$

Parabola 2

Total Perubahan sudut kelengkungan :

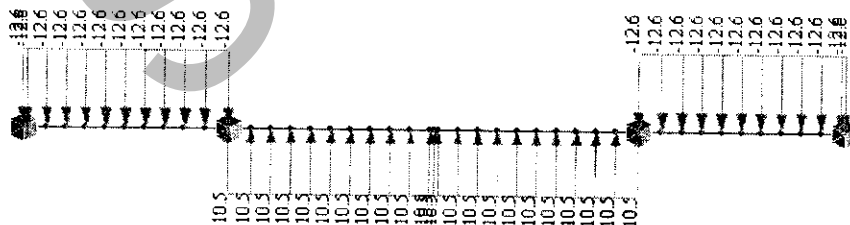
$$L' := 80m$$

$$\theta_2 := \frac{2 \cdot e_2}{L'} \quad \theta_2 = 0.046$$

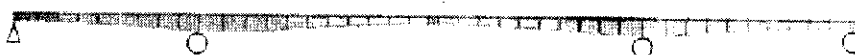
Beban merata ekuivalen :

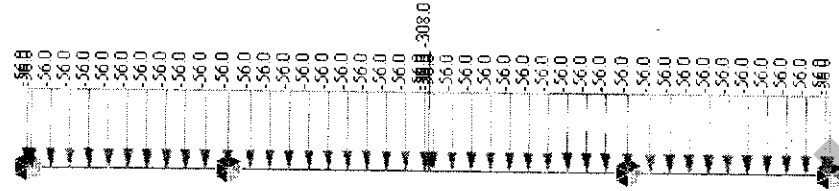
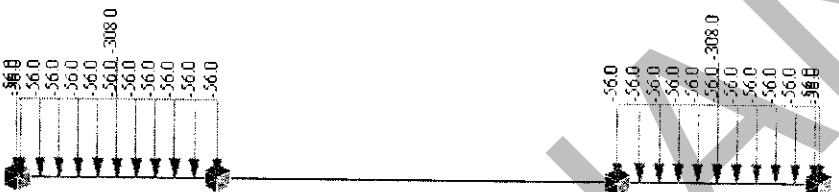
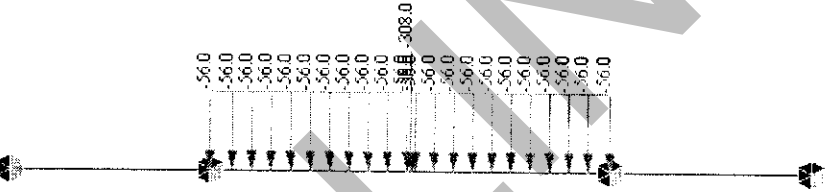
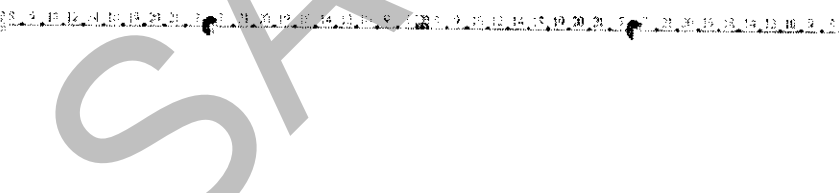
$$wp_2 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_2}{L'}$$

$$wp_2 := \frac{F \cdot \theta_2}{L'} \quad wp_2 = 12.22 \cdot \frac{kN}{m} \quad (\uparrow)$$



2. Pemodelan

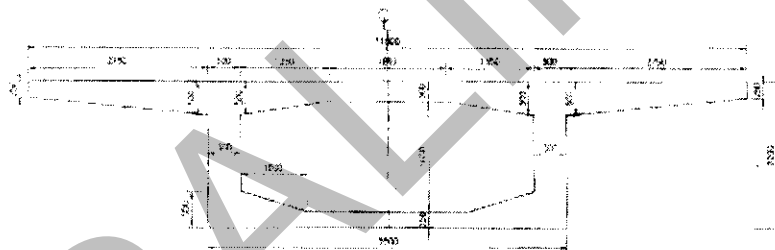


<p>Input Beban</p> <p>Load case #1</p>  <p>Load case #2</p>  <p>Load case #3</p> 	<p>Beban harus disusun agar dapat diperoleh momen paling kritis baik momen negatif maupun positif.</p> <p>Load Case #1 ditentukan untuk memperoleh momen negative maksimum, sedangkan load case #2 untuk momen positif di tengah bentang.</p>
<p>Input Properties penampang</p> 	<p>Catatan:</p> <p>Properties penampang tiap potongan harus dihitung manual dan diinput kedalam software. (sebaiknya digunakan software yang dapat menghitung penampang non prismatis dengan baik). Properties penampang inersia I, dan luas A bisa dihitung juga menggunakan software prestress PBKT dalam paket manual.</p>

MANUAL PERENCANAAN STRUKTUR BETON PRATEGANG UNTUK JEMBATAN

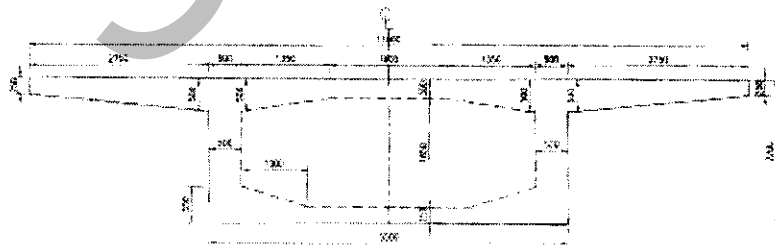
ID	Type	Shape	Name	Area (m ²)	Asy (m ²)	Asz (m ²)	Ixx (m ⁴)	Iyy (m ⁴)	Izz (m ⁴)
22	PSC	ICEL	box 1	14.1625	10.8638	5.2301	11.0539	6.3548	84.2970
17	PSC	ICEL	box 10	10.3350	4.7563	2.8529	7.2212	26.0718	86.7379
6	PSC	ICEL	box 11	11.0750	4.7833	3.6694	9.3107	32.2140	86.7293
7	PSC	ICEL	box 12	23.0625	13.6340	11.4796	23.2548	46.6434	93.7324
1	PSC	ICEL	box 2	7.1600	3.8339	0.9297	2.7618	4.8229	53.8341
2	PSC	ICEL	box 3	7.2200	3.5759	0.8907	2.8923	4.8939	54.0730
3	PSC	ICEL	box 4	7.3600	3.4758	0.8150	3.1357	5.7452	54.8892
11	PSC	ICEL	box 5	8.1050	4.1134	1.1141	3.8119	7.4608	59.4295
16	PSC	ICEL	box 6	8.1700	4.1629	1.4046	4.0575	9.1916	67.8603
4	PSC	ICEL	box 7	8.7675	4.3313	1.8238	4.7510	11.9734	59.8787
18	PSC	ICEL	box 8	9.1400	4.2979	2.0138	6.3638	15.1858	81.7730
5	PSC	ICEL	box 9	9.9650	4.8550	2.3148	8.2542	19.9378	87.1119
9	Tapered	ICEL	bvar1	7.1600	3.8339	0.9297	2.7618	4.8229	53.8341
8	Tapered	ICEL	bvar2	7.2200	3.5759	0.8907	2.8923	4.8939	54.0730
10	Tapered	ICEL	bvar3	7.3600	3.4758	0.8150	3.1357	5.7452	54.8892
12	Tapered	ICEL	bvar4	8.1050	4.1134	1.1141	3.8119	7.4608	59.4295
14	Tapered	ICEL	bvar5	8.1700	4.1629	1.4046	4.0575	9.1916	67.8603
18	Tapered	ICEL	bvar6	8.7675	4.3313	1.8238	4.7510	11.9734	59.8787
19	Tapered	ICEL	bvar7	9.2150	4.5108	2.0628	6.4248	16.3396	81.8910
20	Tapered	ICEL	bvar8	9.9650	4.8550	2.3148	8.2542	19.9378	87.1119
21	Tapered	ICEL	bvar9	10.3350	4.7563	2.8529	7.2212	26.0718	86.7379
13	Tapered	ICEL	Var-1	4.8250	2.8502	0.8678	2.6605	4.4258	12.8172

Potongan ujung tipikal



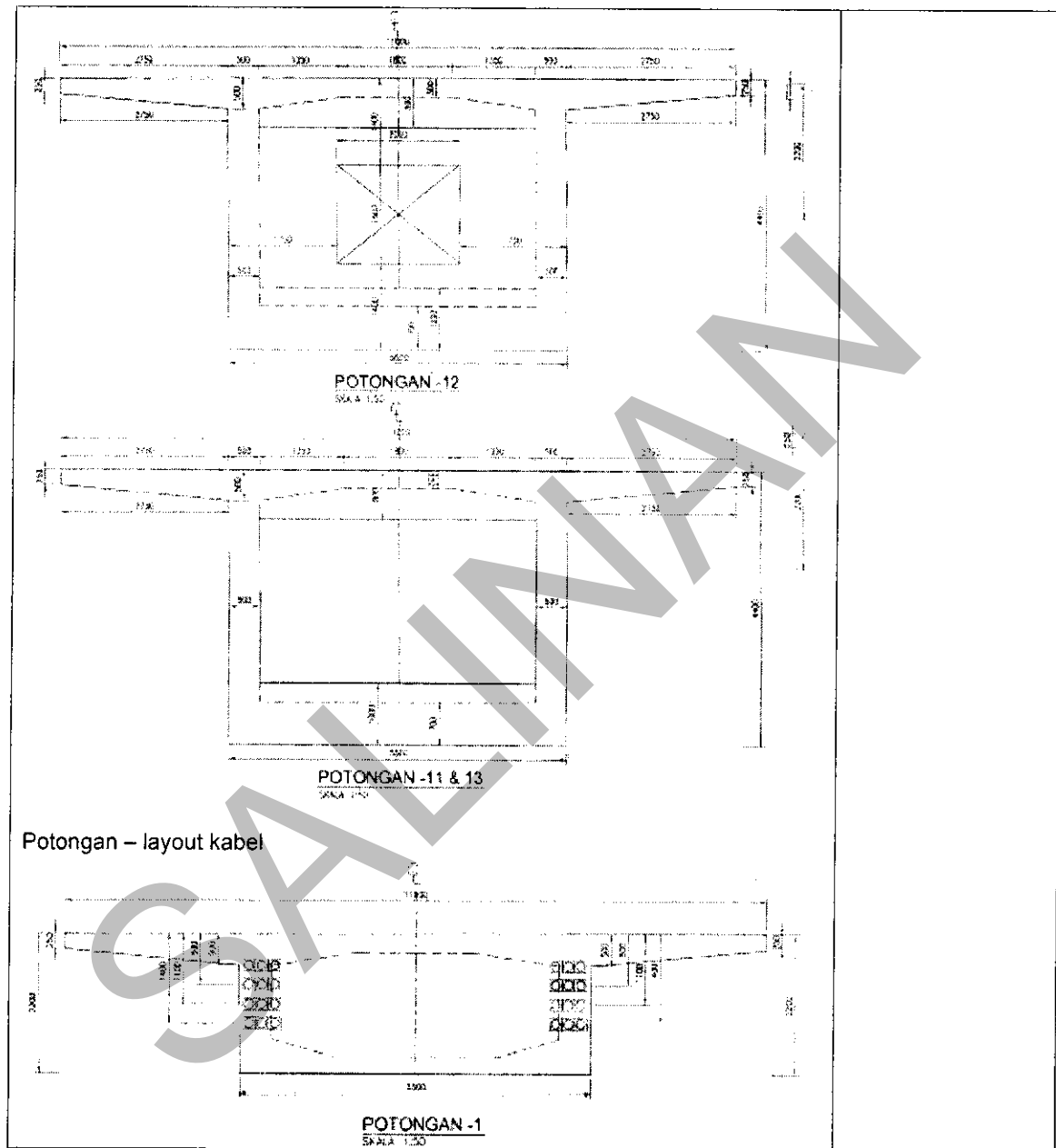
POTONGAN -2 & 22

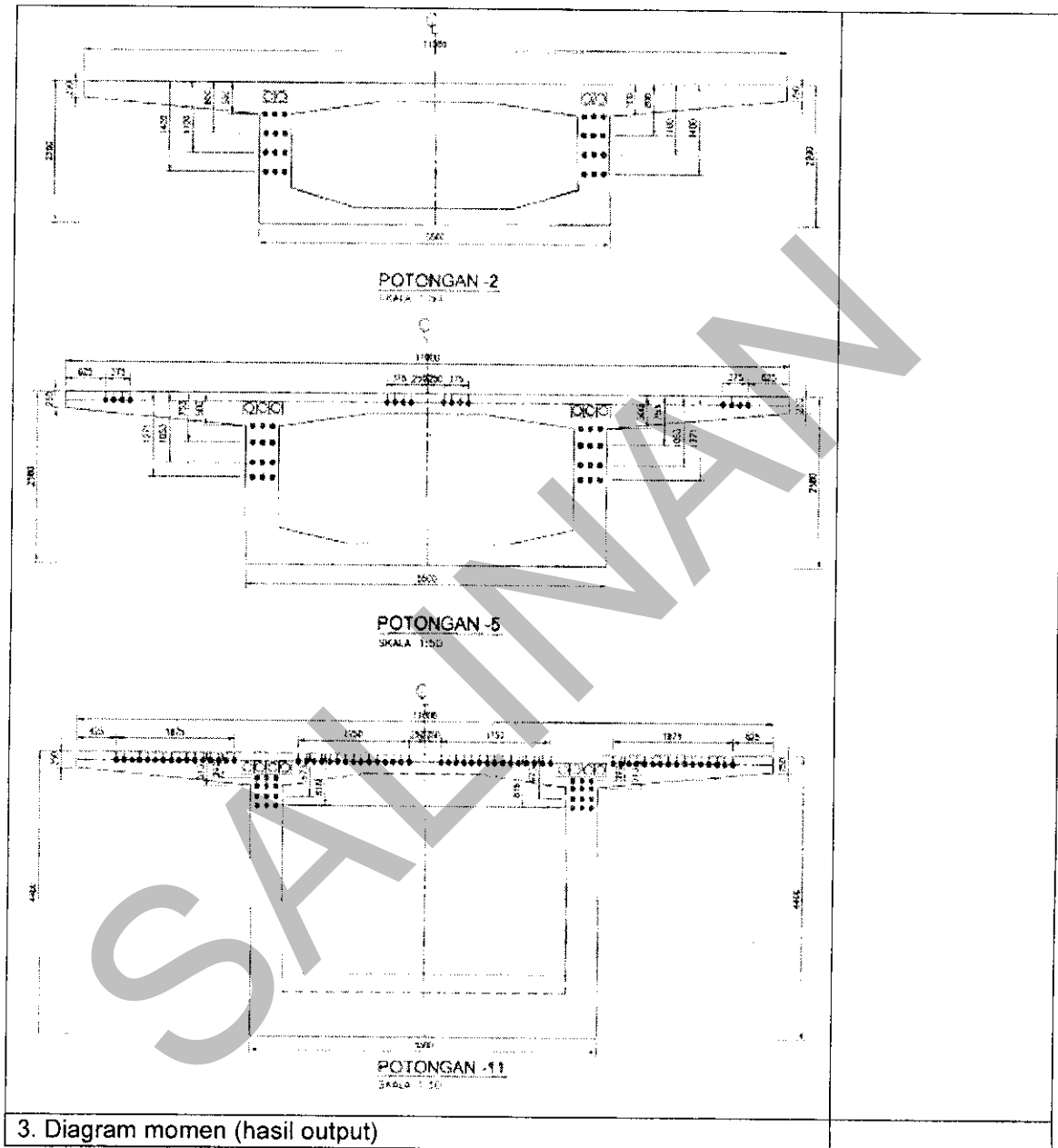
SKALA 1:50

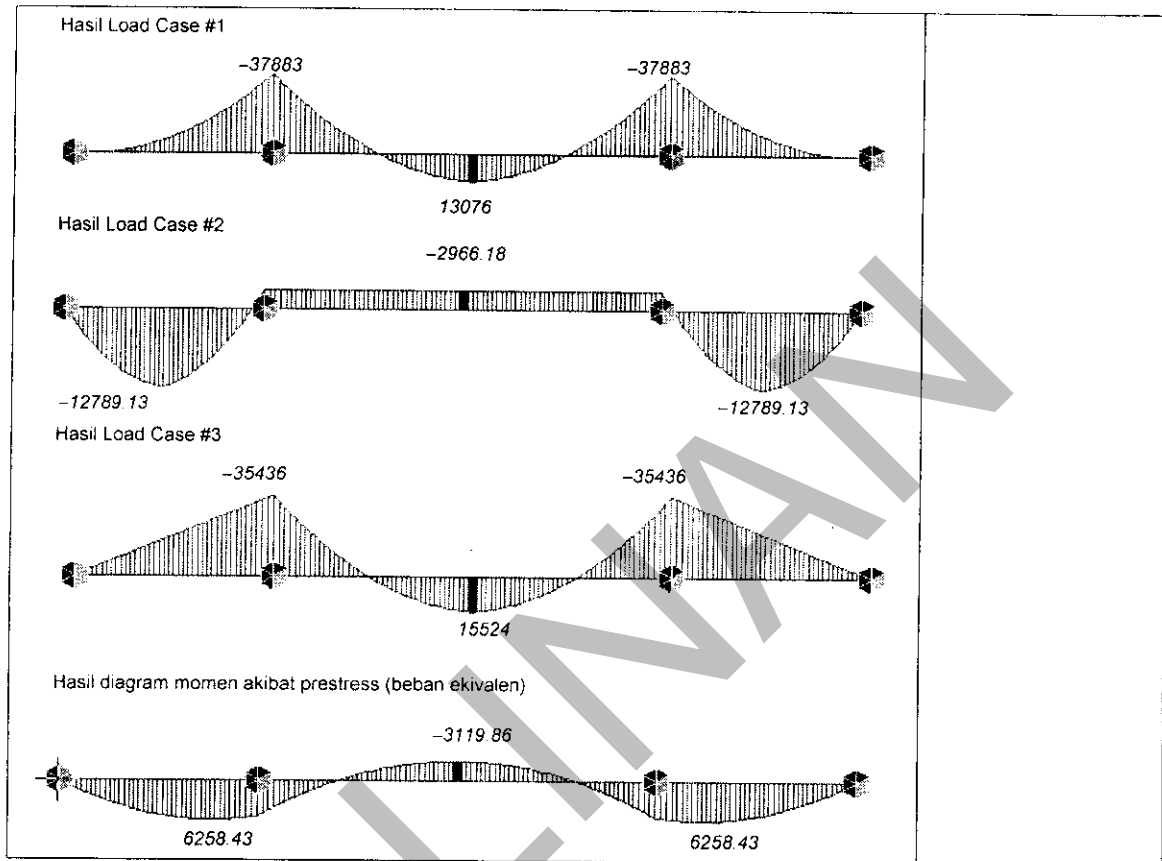


POTONGAN -1 & 23

SKALA 1:50







4. Check Tegangan

Asumsi beban mati dipikul oleh kabel prategang atas pada saat ereksi.
Dengan demikian kabel tendon hanya memikul beban lalu lintas saja.

Tegangan di titik E

Tegangan di serat atas

$$M_{ps} := -2960.35 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad I := 6.35478 \text{ E}+12 \cdot \text{mm}^4 \quad Y_t := 834.0618 \text{ mm}$$

$$M_{LL} := 15524 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad A_c := 14162500 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_a = \frac{-F}{A_c} - \frac{M_{ps}}{I} \cdot Y_t - \frac{M_{LL}}{I} \cdot Y_t > \sigma_{tk} := -0.45 \cdot f_c'$$

$$\frac{-F}{A_c} - \frac{M_{ps}}{I} \cdot Y_t - \frac{M_{LL}}{I} \cdot Y_t = -3.54 \text{ MPa} > \sigma_{tk} = -16.65 \text{ MPa}$$

OK !

Tegangan di serat bawah

$$M_{ps} := -3256 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad I := 6.35478 \text{ E}+12 \cdot \text{mm}^4 \quad Y_b := 2200 \text{ mm} - Y_t$$

$$M_{LL} := 15524 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad A_c := 14162500 \text{ mm}^2 \quad Y_b = 1.366 \text{ m}$$

$$\sigma_b = \frac{-F}{A_c} + \frac{M_{ps}}{I} \cdot Y_b + \frac{M_{LL}}{I} \cdot Y_b < \sigma_{tr} := 0.5 \cdot \sqrt{f_c'} \cdot (\text{MPa})$$

$$\frac{-F}{A_c} + \frac{M_{ps}}{I} \cdot Y_b + \frac{M_{LL}}{I} \cdot Y_b = 0.746 \text{ MPa} < \sigma_{tr} = 3.041 \text{ MPa}$$

OK !

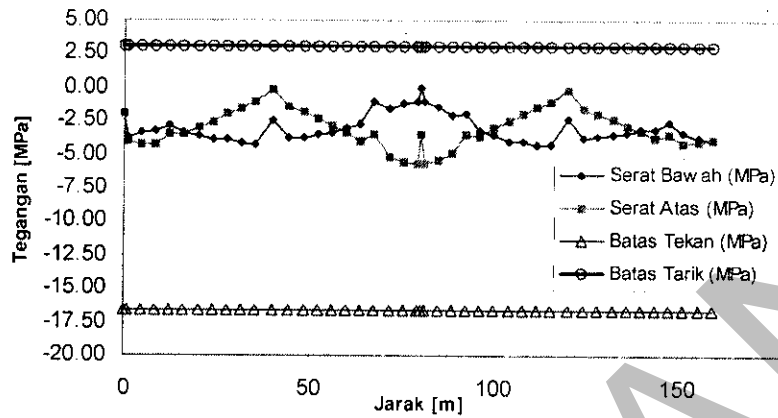
Perhitungan pada titik-titik lainnya sepanjang jembatan dapat digambarkan ke dalam grafik sebagai berikut:

Keterangan:

M_{ps} = Momen akibat beban prategang ekuivalen.

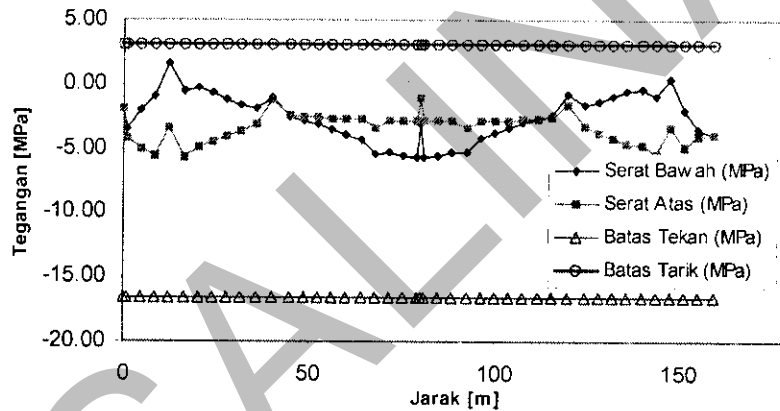
M_{LL} = Momen akibat beban hidup.

Load case #1 + Prategang

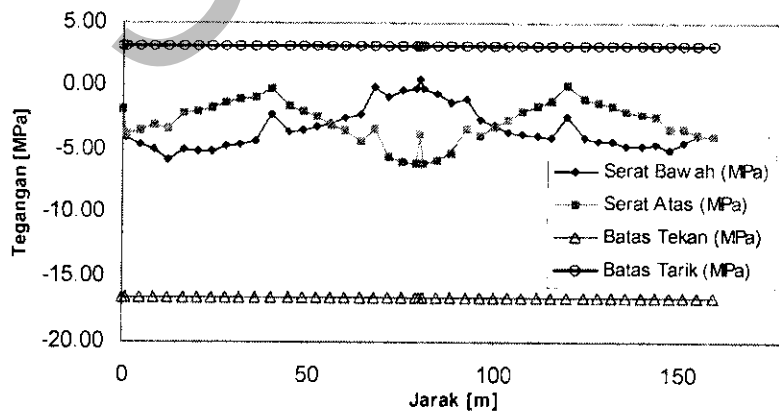


Seperti terlihat pada grafik bahwa tegangan yang terjadi masih berada diantara batas tarik dan tekan yang diijinkan. dengan demikian struktur box girder ini aman.

Load case #2 + Prategang



Load case #3 + Prategang



5. Check terhadap kondisi batas

$$\phi := 0.8$$

$$f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$$

$$f_{py} := 0.9 f_{pu} \quad f_{py} = 1674 \text{ MPa}$$

$$A_{ps} := n_{ps} \cdot A_{ps1} \quad A_{ps} = 0.029 \text{ m}^2$$

Di tengah bentang (titik E)

$$\text{Luas penampang} \quad A_c := 7.15 \text{ m}^2$$

$$\text{Jarak pusat kabel ke serat atas} \quad d_p := 1825 \text{ mm}$$

$$M_u = 2.0 \cdot M_{uLL}$$

$$M_u := 2.0 \cdot 15524 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = 31048 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

maka : Nilai untuk γ_p

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0.9$$

0.55 untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0.8$

0.4 untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$

0.28 untuk $f_{py}/f_{pu} \geq 0.9$

$$\gamma_p := 0.28$$

$$\beta_1 := \begin{cases} 0.85 & \text{if } f_{c'} \leq 30 \text{ MPa} \\ 0.65 & \text{if } f_{c'} \geq 55 \text{ MPa} \\ 0.85 - 0.008 \cdot \left[\frac{f_{c'}}{(\text{MPa})} - 30 \right] & \text{if } 30 \text{ MPa} < f_{c'} \leq 55 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 0.794$$

$$\rho_p := \frac{A_{ps}}{A_c} \quad \rho_p = 0.403 \%$$

$$\rho_c := 0 \quad \omega_c := 0$$

$$\rho_t := 0 \quad \omega_t := 0$$

$$d := 0$$

$$f_{ps} := f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_{c'}} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega_t - \omega_c) \right] \right]$$

$$f_{ps} = 1727.185 \text{ MPa}$$

Lebar stress blok pada beton

asumsi tinggi tegangan tekan saat ultimate, a berada di pelat

lebar pelat $bt := 11m$

tebal pelat $hpl := 250mm$

$$Tps := fps \cdot Aps \quad Tps = 4.974 \times 10^4 \cdot kN$$

$$a := \frac{Tps}{0.85 \cdot fc' \cdot bt} \quad a = 143.786 \cdot mm < hpl = 250 \cdot mm$$

(OK, asumsi benar)

Periksa Tulangan Maksimum

Berdasarkan ACI / NAWY (untuk balok segi-4)

$$\omega p := \rho p \cdot \frac{fps}{fc'} \quad \omega p = 0.188 < 0.36 \cdot \beta 1 = 0.286$$

OK, under reinforce (jika prestressed only)

Periksa Momen Desain Ultimate

$$Mn := Tps \cdot \left(dp - \frac{a}{2} \right)$$

$$Mn = 87204.649 \cdot kN \cdot m$$

Momen Nominal $Mn = 87204.6487 \cdot kN \cdot m$

Periksa :

$$\phi \cdot Mn = 69763.719 \cdot kN \cdot m > Mu = 31048 \cdot kN \cdot m$$

periksa apakah $\phi Mn > Mu$ jika ya --> OK

Untuk pemahaman yang komprehensif terhadap perhitungan prategang, berikut ini akan diuraikan contoh aplikatif perhitungan jembatan box girder.

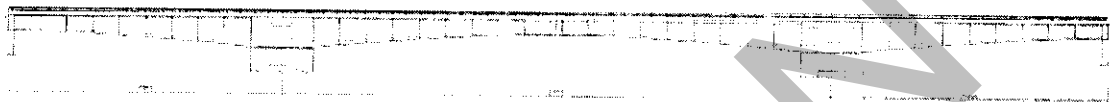
CONTOH 5.6

Analisis Lentur Balok Box-Girder

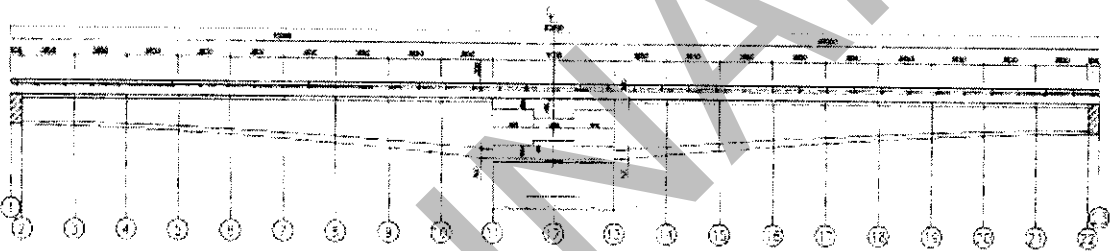
1

1

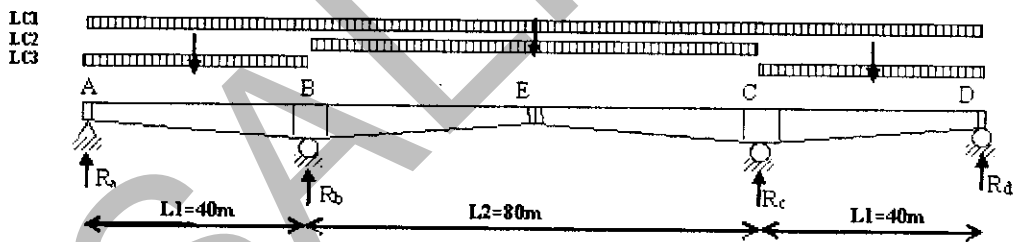
SOAL : Analisis tegangan lentur pada struktur box-girder menerus berikut ini.



Balok Simetris



Kombinasi beban hidup yang diperhitungkan



Diketahui :

Beban

Asumsi beban lalu lintas, $w_{LL} = 8 \text{ kN/m}^2$ total 100% selebar jalan 5.5m selebihnya 50%

$$w_{LL} := 8 \cdot 5.5 + 4 \cdot 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_{LL} = 56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Asumsi beban lalu lintas terpusat, $P_{LL} = 44 \text{ kN/m}$ total 100% selebar jalan 5.5m selebihnya 50%

$$P_{LL} := (44 \cdot 5.5 + 22 \cdot 3) \cdot 1.4 \quad P_{LL} = 431.2 \text{ kN}$$

Material

Mutu beton $f_c' := 37 \text{ MPa}$

Mutu strand $f_{pu} := 1860 \text{ MPa}$ (ASTM A416 270 K)

Diameter strand 12.5 mm (0.5 inc)

Luas strand $A_{ps1} := 100 \text{ mm}^2$

Jumlah strand per tendon $n_{st} := 12$

Jumlah tendon $n_t := 2 \cdot 12 \quad n_t = 24$

Jumlah strand total $n_{ps} := n_{st} \cdot n_t \quad n_{ps} = 288$

Asumsi tegangan efektif $f_{pe} := 0.4 \cdot f_{pu} \quad f_{pe} = 744 \text{ MPa}$

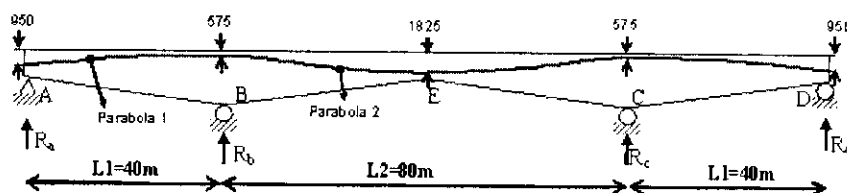
Gaya prategang $F := f_{pe} \cdot n_{ps} \cdot A_{ps1} \quad F = 21427.2 \text{ kN}$

Panjang bentang $L := 40 + 80 + 40$

Eksentrisitas $e_1 := (950 - 575) \text{ mm} \quad e_2 := 1825 \text{ mm}$
 $e_1 = 0.375 \text{ m}$

1. Menentukan Beban Ekuivalen

Menentukan center gravitasi kabel (cgs) untuk mendapatkan layout kabel gabungan.



Menentukan besarnya beban merata ekuivalen.

Struktur ini dapat dimodelkan sebagai sendi di ujung kiri dan rol pada perletakan lainnya. Pada contoh sebelumnya telah diberikan perhitungan dengan analisis struktur secara manual metoda cross dan 3-momen, namun pada contoh ini akan dihitung dengan software sejenis SAP2000 atau MIDAS.

Parabola 1

Total Perubahan sudut kelengkungan :

$$L' := 40m$$

$$\theta_1 := \frac{2 \cdot e_1}{L'} \quad \theta_1 = 0.019$$

Beban merata ekuivalen :

$$wp_1 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_1}{L'}$$

$$wp_1 := \frac{F \cdot \theta_1}{L'} \quad wp_1 = 10.044 \cdot \frac{kN}{m} \quad (\downarrow)$$

Parabola 2

Total Perubahan sudut kelengkungan :

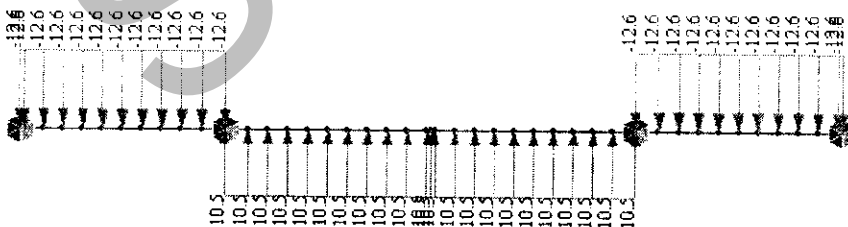
$$L' := 80m$$

$$\theta_2 := \frac{2 \cdot e_2}{L'} \quad \theta_2 = 0.046$$

Beban merata ekuivalen :

$$wp_2 = \frac{F}{R} = \frac{F \cdot \theta_2}{L'}$$

$$wp_2 := \frac{F \cdot \theta_2}{L'} \quad wp_2 = 12.22 \cdot \frac{kN}{m} \quad (\uparrow)$$



LAMPIRAN

MANUAL PERENCANAAN STRUKTUR BETON PRATEGANG UNTUK JEMBATAN

LAMPIRAN A RUMUS DAN DIAGRAM BALOK

A.1 NOTASI

E	= Modulus Elastisitas, kN/m^2 .
I	= Momen Inersia balok, m^4 .
L	= Panjang total balok antara titik-titik reaksi, m.
M_{\max}	= Momen maksimum, kN-m .
M_1	= Momen maksimum pada potongan kiri balok, kN-m .
M_2	= Momen maksimum di potongan kanan balok, kN-m .
M_3	= Momen positif maksimum beam dengan kombinasi momen ujung, kN-m .
M_x	= Momen sejarak x dari ujung balok, kN-m .
p	= Beban terpusat, kN
P_1	= Beban terpusat yang terdekat dari reaksi kiri, kN .
P_2	= Beban terpusat yang terdekat dari reaksi kanan, dan besarnya berbeda dengan P_1 , kN .
R	= Reaksi balok ujung untuk kondisi pembebanan simetris, kN .
R_1	= Reaksi balok ujung kiri, kN .
R_2	= Reaksi balok ujung kanan atau antara, kN .
R_3	= Reaksi balok ujung kanan, kN .
V	= Geser vertikal maksimum untuk kondisi pembebanan simetris, kN .
V_1	= Geser vertikal maksimum pada reaksi kiri, kN .
V_2	= Geser vertikal maksimum pada reaksi kanan, atau kiri antara, kN .
V_3	= Geser vertikal maksimum pada reaksi kanan, atau kanan antara, kN .
V_x	= Geser vertikal sejarak x dari ujung balok, kN .
W	= Beban total di atas balok, kN .
a	= Jarak tertentu di sepanjang balok, m.

- b = Jarak tertentu di sepanjang balok yang mungkin nilainya lebih besar atau lebih kecil dari a , m.
- l = Panjang total balok antara titik-titik reaksi, m.
- w = Beban terdistribusi seragam per unit panjang, kN/m.
- w_1 = Beban terdistribusi seragam per unit panjang dekat reaksi kiri, kN/m.
- w_2 = Beban terdistribusi seragam per unit panjang dekat reaksi kanan dan nilainya berbeda dengan w_1 , kN/m.
- x = Besarnya jarak di sepanjang balok dari ujung kiri balok, m.
- x_1 = Besarnya jarak di sepanjang overhang dari titik reaksi terdekat, m.
- Δ_{max} = Defleksi maksimum, m.
- Δ_a = Defleksi pada beban titik, m.
- Δ_x = Defleksi pada jarak x dari titik reaksi kiri, m.
- Δ_{x1} = Defleksi balok overhange pada jarak tertentu dari titik reaksi terdekat, m.

A.2 FORMULASI YANG SERING DIGUNAKAN.

Formulasi di bawah ini sering diperlukan dalam perancangan struktural untuk memudahkan insinyur atau siapapun yang jarang menggunakan rumusan ini sebagai referensi

Balok

Tegangan lentur pada serat ekstrim:

$$f = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M}{S}$$

Tegangan lentur pada serat tertentu:

$$f = \frac{M \cdot y}{I}, \text{ dimana } y = \text{jarak dari sumbu neutral penampang.}$$

Sudut dan defleksi pada titik tertentu

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M$$

Dimana :

x = jarak absis dari titik perletakan

y = jarak ordinat dari sumbu netral penampang

(Integrasi pertama memberikan rotasi/sudut, integrasi kedua memberikan defleksi. Semua konstanta integrasi harus ditentukan).

Balok Menerus (teorema tiga momen)

Beban Merata:

$$M_a \frac{L_1}{I_1} + 2M_b \left(\frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_c \frac{L_2}{I_2} = -\frac{1}{4} \left(\frac{w_1(L_1)^3}{I_1} + \frac{w_2(L_2)^3}{I_2} \right)$$

Beban Terpusat:

$$M_a \frac{L_1}{I_1} + 2M_b \left(\frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_c \frac{L_2}{I_2} = -\frac{P_1 a_1 b_1}{I_1} \left(1 + \frac{a_1}{L_1} \right) - \frac{P_2 a_2 b_2}{I_2} \left(1 + \frac{a_2}{L_2} \right)$$

Dengan menggunakan dua bentang yang bersebelahan dalam struktur menerus:

M_a, M_b, M_c = Momen pada perletakan kiri, tengah dan kanan secara berurutan pada sepasang bentang yang bersebelahan.

L_1, L_2 = Panjang bentang pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

I_1, I_2 = Momen inersia pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

w_1, w_2 = Beban merata pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

P_1, P_2 = Beban terpusat pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

a_1, a_2 = Jarak beban terpusat dari kiri perletakan pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

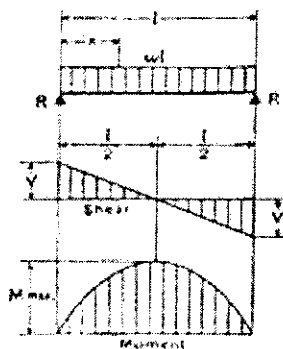
b_1, b_2 = Jarak beban terpusat dari kanan perletakan pada bentang kiri dan kanan secara berurutan.

Rumusan tiga momen ini digunakan untuk balok dengan momen inersia konstan pada setiap span tetapi nilainya boleh berbeda masing-masing span, menerus di atas tiga perletakan atau lebih. Dengan menuliskan persamaan diatas untuk sepasang bentang dan menentukan nilai momen-momen ujung (biasanya nol), maka momen lainnya dapat ditentukan dengan cara ini.

A.3 FORMULASI DAN DIAGRAM BALOK

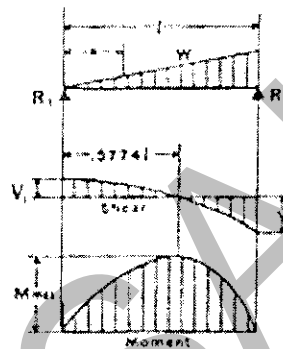
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

1. SIMPLE BEAM—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD



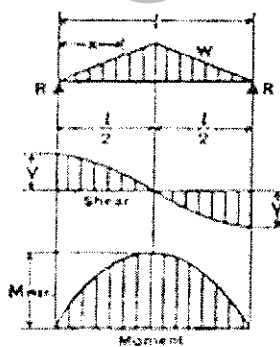
$$\begin{aligned} \text{Total Equiv. Uniform Load} &= wl \\ R = V &= \frac{wl}{2} \\ V_x &= \left(\frac{l}{2} - x \right) \\ M_{\text{max. (di tengah)}} &= \frac{wl^2}{8} \\ M_x &= \frac{wx}{2} (l - x) \\ \Delta_{\text{max. (di tengah)}} &= \frac{5wl^4}{384EI} \\ \Delta_x &= \frac{wx}{24EI} (l^3 - 2lx^2 + x^3) \end{aligned}$$

2. SIMPLE BEAM—LOAD INCREASING UNIFORMLY TO ONE END



$$\begin{aligned} \text{Total Equiv. Uniform Load} &= \frac{16W}{9\sqrt{3}} = 1.0254W \\ R_1 = V_1 &= \frac{W}{3} \\ R_2 = V_2 \text{ max.} &= \frac{2W}{3} \\ V_x &= \frac{W}{3} - \frac{Wx^2}{l^2} \\ M_{\text{max. (di } x = \frac{l}{\sqrt{3}} = .5774l)} &= \frac{2Wl}{9\sqrt{3}} = .1283Wl \\ M_x &= \frac{Wx}{3\sqrt{3}} (l^2 - x^2) \\ \Delta_{\text{max. (di } x = l\sqrt{1 - \sqrt{3/5}} = .5193l)} &= .01304 \frac{Wl^3}{EI} \\ \Delta_x &= \frac{Wx}{180EI l^2} (3x^4 - 10l^2x^2 + 7l^4) \end{aligned}$$

3. SIMPLE BEAM—LOAD INCREASING UNIFORMLY TO CENTER

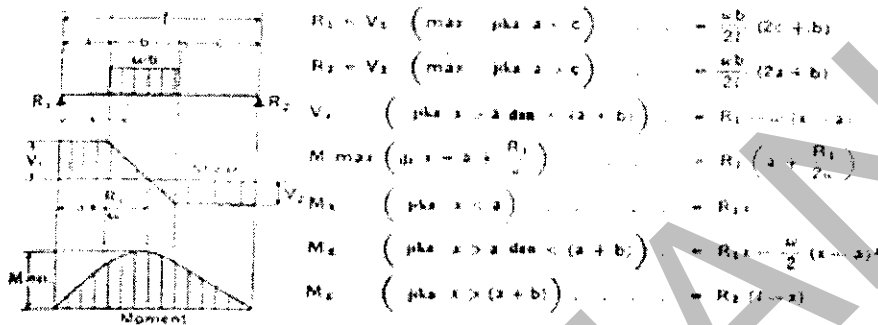


$$\begin{aligned} \text{Total Equiv. Uniform Load} &= \frac{4W}{3} \\ R = V &= \frac{W}{2} \\ V_x \text{ (jika } x < \frac{l}{2}) &= \frac{W}{2l} (l^2 - 4x^2) \\ M_{\text{max. (di tengah)}} &= \frac{Wl^2}{60} \\ M_x \text{ (jika } x < \frac{l}{2}) &= Wx \left(\frac{l}{2} - \frac{2x^2}{3l} \right) \\ \Delta_{\text{max. (di tengah)}} &= \frac{Wl^3}{60EI} \\ \Delta_x \text{ (jika } x < \frac{l}{2}) &= \frac{Wx}{480EI l^2} (5l^2 - 4x^2)x \end{aligned}$$

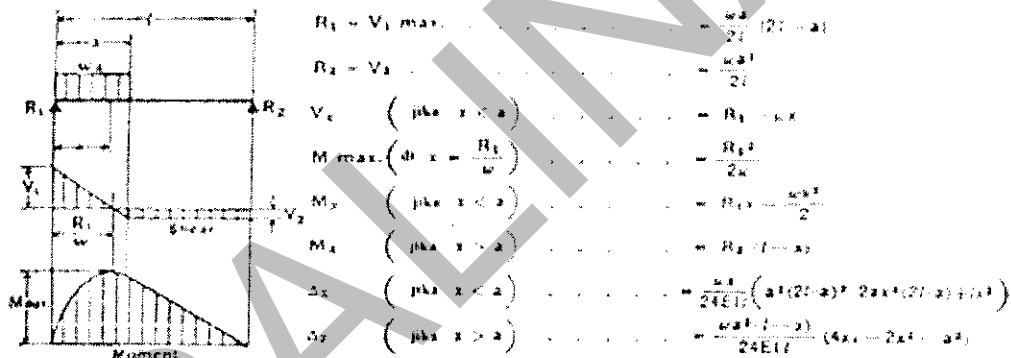
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK

Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

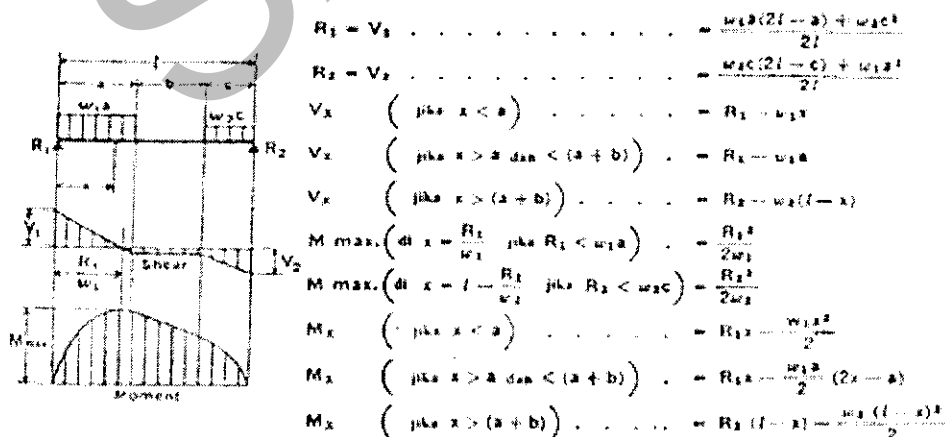
4. SIMPLE BEAM—UNIFORM LOAD PARTIALLY DISTRIBUTED



5. SIMPLE BEAM—UNIFORM LOAD PARTIALLY DISTRIBUTED AT ONE END

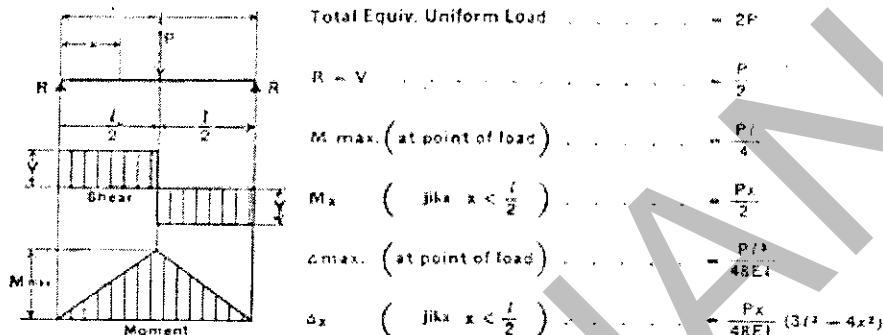


6. SIMPLE BEAM—UNIFORM LOAD PARTIALLY DISTRIBUTED AT EACH END

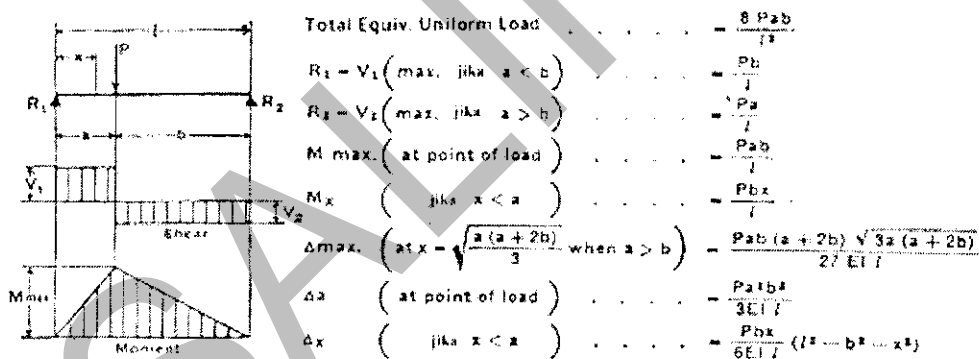


RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

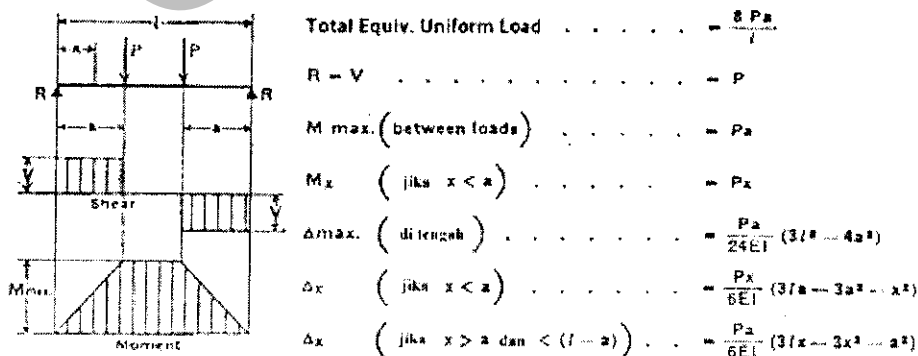
7. SIMPLE BEAM—CONCENTRATED LOAD AT CENTER



8. SIMPLE BEAM—CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT



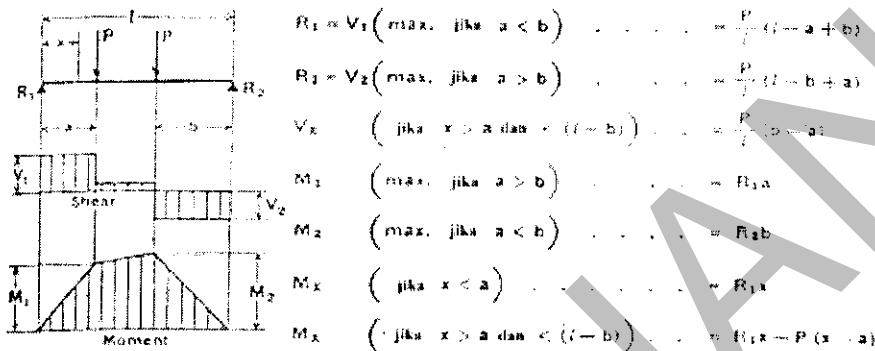
9. SIMPLE BEAM—TWO EQUAL CONCENTRATED LOADS SYMMETRICALLY PLACED



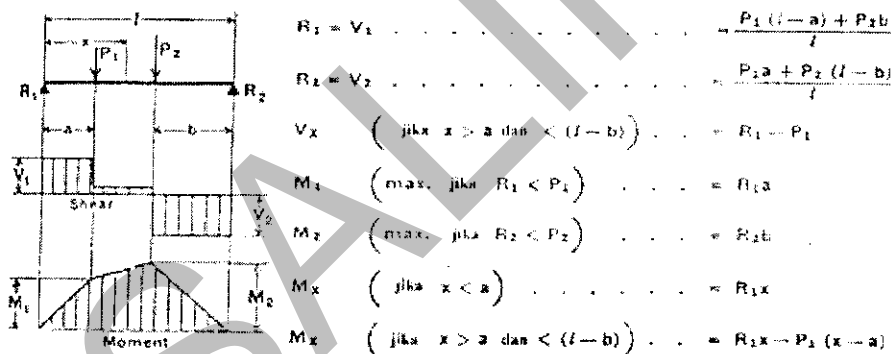
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK

Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

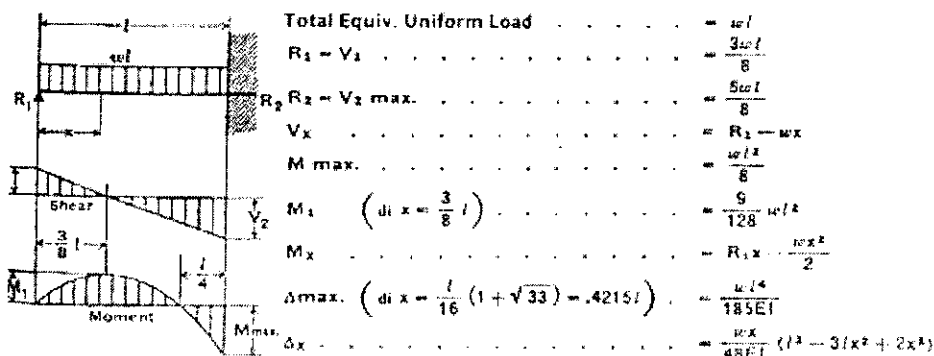
10. SIMPLE BEAM—TWO EQUAL CONCENTRATED LOADS UNSYMMETRICALLY PLACED



11. SIMPLE BEAM—TWO UNEQUAL CONCENTRATED LOADS UNSYMMETRICALLY PLACED

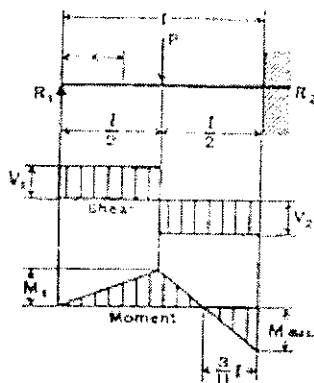


12. BEAM FIXED AT ONE END, SUPPORTED AT OTHER— UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD



RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

13. BEAM FIXED AT ONE END, SUPPORTED AT OTHER— CONCENTRATED LOAD AT CENTER



Total Equiv. Uniform Load $= \frac{3P}{2}$

$R_1 = V_1$ $= \frac{5P}{16}$

$R_2 = V_2$ max. $= \frac{11P}{16}$

M max. (at fixed end) $= \frac{3Pl}{16}$

M_c (at point of load) $= \frac{5Pl}{32}$

M_x (jika $x < \frac{l}{2}$) $= \frac{5Px}{16}$

M_x (jika $x > \frac{l}{2}$) $= P \left(\frac{l}{2} - \frac{11x}{16} \right)$

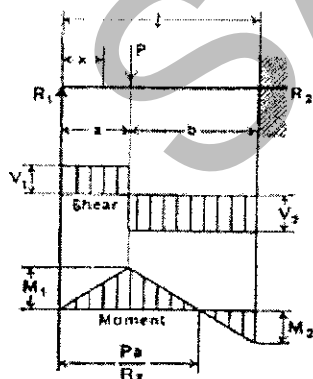
Δ max. (di $x = l \sqrt{\frac{1}{5}} = .4472l$) $= \frac{Pl^3}{48EI \sqrt{5}} = .009317 \frac{Pl^3}{EI}$

Δ_x (at point of load) $= \frac{7Pl^3}{768EI}$

Δ_x (jika $x < \frac{l}{2}$) $= \frac{Px}{96EI} (3l^2 - 5x^2)$

Δ_x (jika $x > \frac{l}{2}$) $= \frac{P}{96EI} (x-l)^2 (11x-2l)$

14. BEAM FIXED AT ONE END, SUPPORTED AT OTHER— CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT



$R_1 = V_1$ $= \frac{Pb^2}{2l^3} (a+2l)$

$R_2 = V_2$ $= \frac{Pa}{2l^3} (3l^2 - a^2)$

M_1 (at point of load) $= R_1 a$

M_x (at fixed end) $= \frac{Pab}{2l^3} (a+l)$

M_x (jika $x < a$) $= R_1 x$

M_x (jika $x > a$) $= R_1 x - P(x-a)$

Δ max. (jika $a < .414l$ at $x = l \frac{l^2+a^2}{3l^2-a^2}$) $= \frac{Pa}{3EI} \frac{(l^2-a^2)^{3/2}}{(3l^2-a^2)^{3/2}}$

Δ max. (jika $a > .414l$ at $x = l \sqrt{\frac{a}{2l+a}}$) $= \frac{Pab^2}{6EI} \sqrt{\frac{a}{2l+a}}$

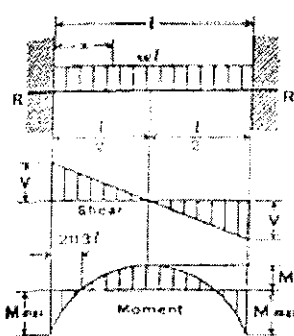
Δ_a (at point of load) $= \frac{Pa^2b^3}{12EI l^3} (3l+a)$

Δ_x (jika $x < a$) $= \frac{Pb^2x}{12EI l^3} (3a^2 - 2lx^2 - ax^2)$

Δ_x (jika $x > a$) $= \frac{Pa}{12EI l^3} (l-x)^2 (3l^2 - a^2x - 2a^2l)$

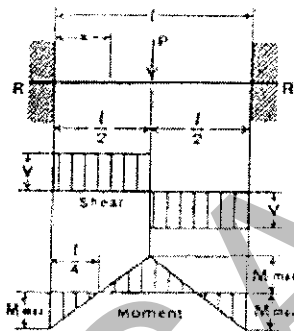
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

15. BEAM FIXED AT BOTH ENDS—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOADS



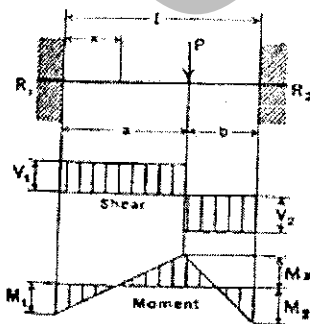
Total Equiv. Uniform Load	$= \frac{2wl}{3}$
$R = V$	$= \frac{wl}{2}$
V_x	$= w \left(\frac{l}{2} - x \right)$
$M_{max.} \text{ (di ujung)}$	$= \frac{wl^2}{12}$
$M_1 \text{ (di tengah)}$	$= -\frac{wl^2}{24}$
M_x	$= \frac{wl}{12} (6lx - l^2 - 6x^2)$
$\Delta_{max.} \text{ (di tengah)}$	$= -\frac{wl^4}{384EI}$
Δ_x	$= -\frac{wx^2}{24EI} (l^2 - x^2)$

16. BEAM FIXED AT BOTH ENDS—CONCENTRATED LOAD AT CENTER



Total Equiv. Uniform Load	$= P$
$R = V$	$= \frac{P}{2}$
$M_{max.} \text{ (tengah dan ujung)}$	$= -\frac{Pl}{8}$
$M_x \text{ (jika } x < \frac{l}{2})$	$= -\frac{P}{8} (4x^2 - l^2)$
$\Delta_{max.} \text{ (di tengah)}$	$= \frac{Pl^3}{192EI}$
$\Delta_x \text{ (jika } x < \frac{l}{2})$	$= -\frac{Px^2}{48EI} (3l - 4x)$

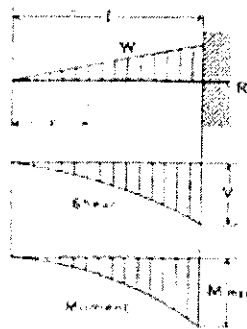
17. BEAM FIXED AT BOTH ENDS—CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT



$R_1 = V_1 \text{ (max. jika } a < b)$	$= \frac{Pl^2}{l^3} (3a + b)$
$R_2 = V_2 \text{ (max. jika } a > b)$	$= \frac{Pl^2}{l^3} (a + 3b)$
$M_1 \text{ (max. jika } a < b)$	$= \frac{Pab^2}{l^2}$
$M_2 \text{ (max. jika } a > b)$	$= \frac{Pa^2b}{l^2}$
$M_a \text{ (at point of load)}$	$= \frac{2Pa^2b^2}{l^3}$
$M_x \text{ (jika } x < a)$	$= R_1x - \frac{Pab^2}{l^2}$
$\Delta_{max.} \text{ (jika } a > b \text{ at } x = \frac{2a}{3a+b})$	$= \frac{2Pa^2b^2}{3EI(3a+b)^2}$
$\Delta_a \text{ (at point of load)}$	$= \frac{Pa^2b^2}{3EI l^3}$
$\Delta_x \text{ (jika } x < a)$	$= \frac{Pb^2x^3}{6EI l^3} (3a - 3ax - bx)$

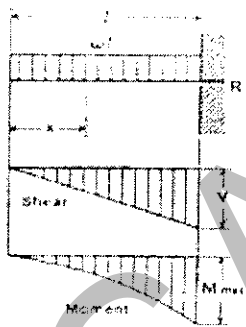
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

18. CANTILEVER BEAM—LOAD INCREASING UNIFORMLY TO FIXED END



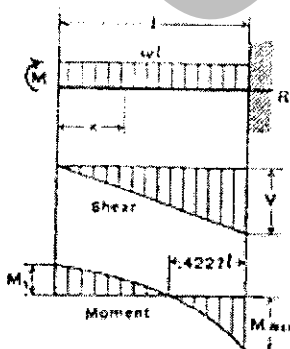
Total Equiv. Uniform Load	$= \frac{8}{3} W$
$R = V$	$= W$
V_x	$= W \frac{x^2}{l^2}$
M max. (at fixed end)	$= \frac{Wl^2}{3}$
M_x	$= \frac{Wx^3}{3l^2}$
Δ max. (at free end)	$= \frac{Wl^4}{15EI}$
Δ_x	$= \frac{W}{60EI} (x^5 - 5l^4x + 4l^5)$

19. CANTILEVER BEAM—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD



Total Equiv. Uniform Load	$= 4wl$
$R = V$	$= wl$
V_x	$= wx$
M max. (at fixed end)	$= \frac{wx^2}{2}$
M_x	$= \frac{wx^3}{6}$
Δ max. (at free end)	$= \frac{wl^4}{8EI}$
Δ_x	$= \frac{wl}{24EI} (x^4 - 4l^3x + 3l^4)$

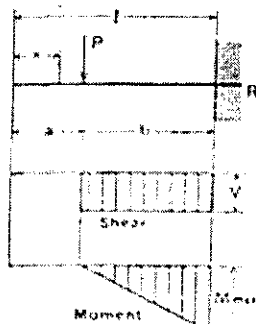
20. BEAM FIXED AT ONE END, FREE TO DEFLECT VERTICALLY BUT NOT ROTATE AT OTHER—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD



Total Equiv. Uniform Load	$= \frac{8}{3} wl$
$R = V$	$= wl$
V_x	$= wx$
M max. (at fixed end)	$= \frac{wl^2}{3}$
M_l (at deflected end)	$= \frac{wl^2}{6}$
M_x	$= \frac{wl}{6} (l^2 - 3x^2)$
Δ max. (at deflected end)	$= \frac{wl^4}{24EI}$
Δ_x	$= \frac{wl}{24EI} (l^2 - x^2)x$

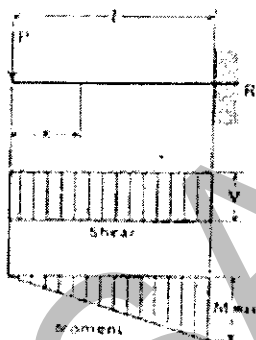
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

21. CANTILEVER BEAM—CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT



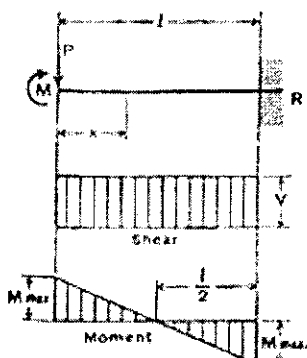
Total Equiv. Uniform Load	$= \frac{8Pb}{l}$
$R = V$	$= P$
$M_{max.}$ (at fixed end)	$= Pb$
M_x (if $x > a$)	$= P(x - a)$
$\Delta_{max.}$ (at free end)	$= \frac{Pb^2}{6EI} (3l - b)$
Δ_x (at point of load)	$= \frac{Pb^3}{3EI}$
Δ_x (if $x < a$)	$= \frac{Px^2}{6EI} (3l - 3x - b)$
Δ_x (if $x > a$)	$= \frac{P(l - x)^2}{6EI} (3b - l + x)$

22. CANTILEVER BEAM—CONCENTRATED LOAD AT FREE END



Total Equiv. Uniform Load	$= 8P$
$R = V$	$= P$
$M_{max.}$ (at fixed end)	$= Pl$
M_x	$= Px$
$\Delta_{max.}$ (at free end)	$= \frac{Pl^2}{3EI}$
Δ_x	$= \frac{Px^2}{6EI} (2l^2 - 3l^2x + x^3)$

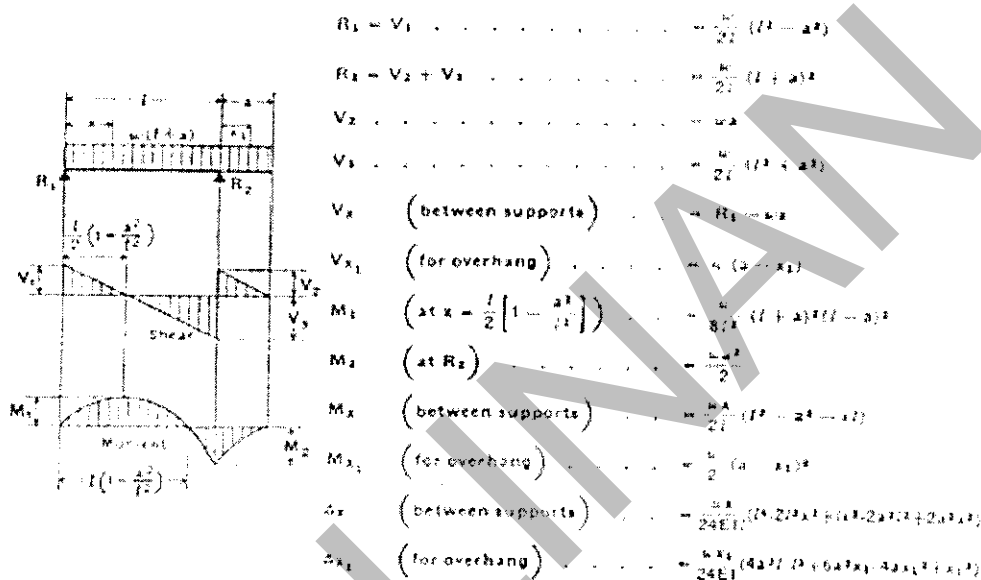
23. BEAM FIXED AT ONE END, FREE TO DEFLECT VERTICALLY BUT NOT ROTATE AT OTHER—CONCENTRATED LOAD AT DEFLECTED END



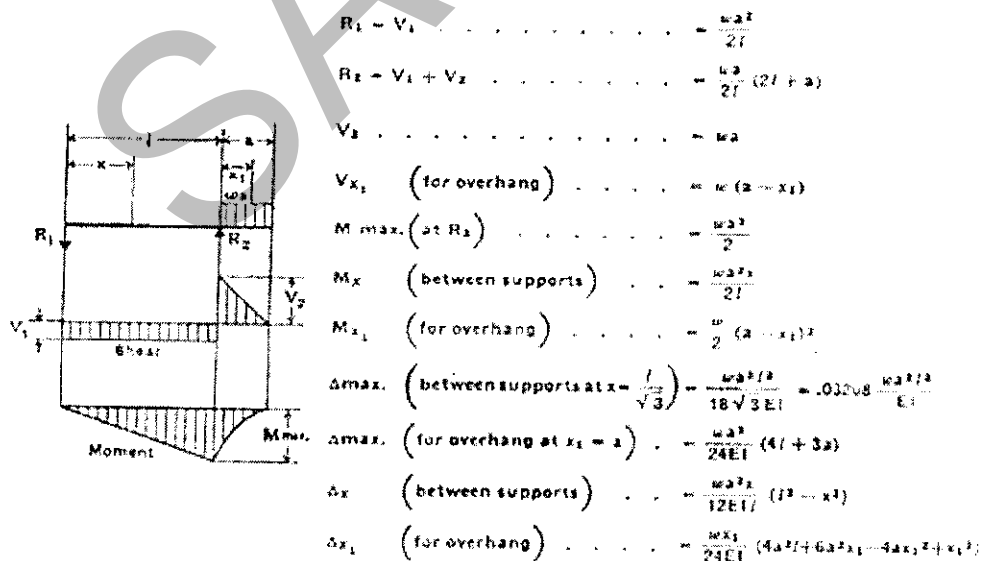
Total Equiv. Uniform Load	$= 4P$
$R = V$	$= P$
$M_{max.}$ (at both ends)	$= \frac{Pl}{2}$
M_x	$= P\left(\frac{l}{2} - x\right)$
$\Delta_{max.}$ (at deflected end)	$= \frac{Pl^2}{12EI}$
Δ_x	$= \frac{P(l - x)^2}{12EI} (l + 2x)$

RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

24. BEAM OVERHANGING ONE SUPPORT—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD

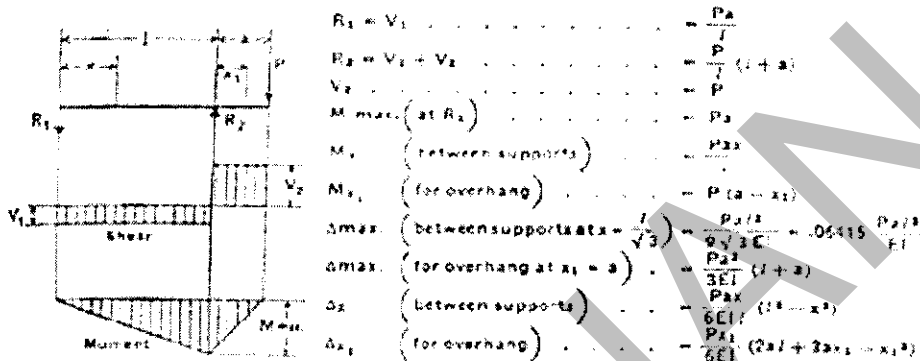


25. BEAM OVERHANGING ONE SUPPORT—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD ON OVERHANG

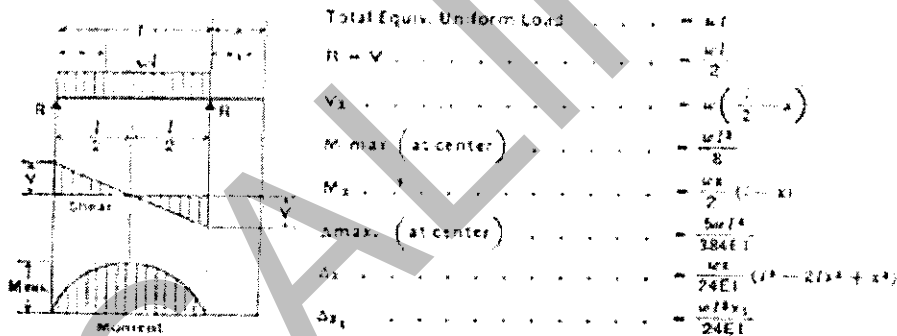


RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

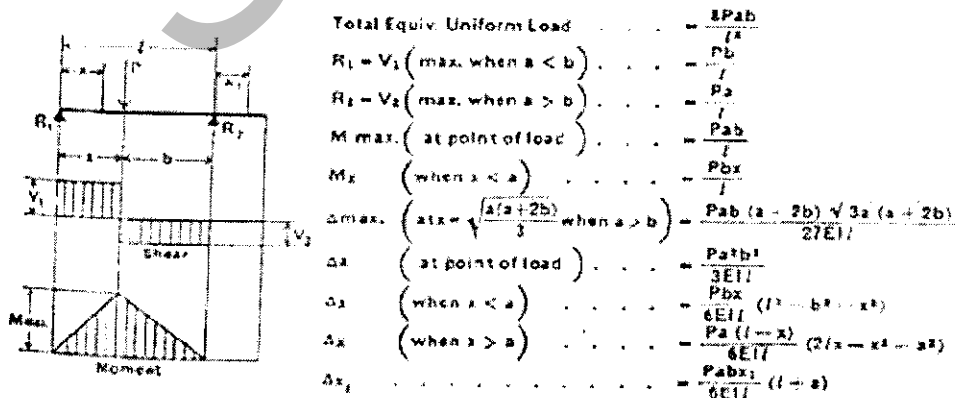
26. BEAM OVERHANGING ONE SUPPORT—CONCENTRATED LOAD AT END OF OVERHANG



27. BEAM OVERHANGING ONE SUPPORT—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD BETWEEN SUPPORTS

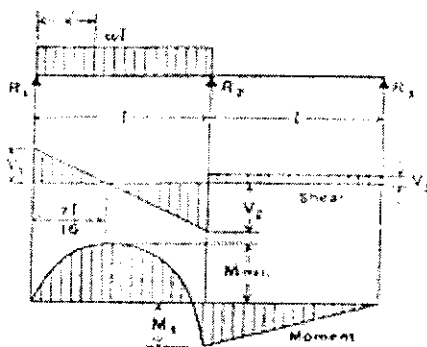


28. BEAM OVERHANGING ONE SUPPORT—CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT BETWEEN SUPPORTS



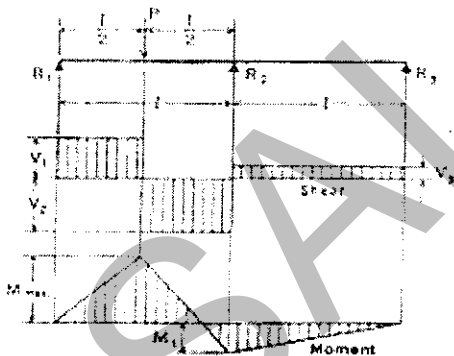
RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

29. CONTINUOUS BEAM—TWO EQUAL SPANS—UNIFORM LOAD ON ONE SPAN



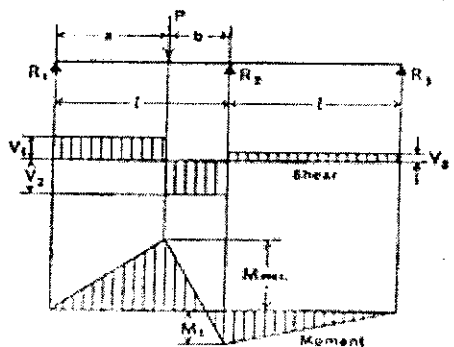
$$\begin{aligned} \text{Total Equiv. Uniform Load} &= \frac{49}{64} w l \\ R_1 - V_1 &= \frac{7}{16} w l \\ R_2 - V_2 + V_1 &= \frac{5}{8} w l \\ R_3 - V_3 &= \frac{1}{16} w l \\ V_1 &= \frac{9}{16} w l \\ M_{\text{max. (at } x = \frac{7}{16} l)} &= \frac{49}{512} w l^2 \\ M_1 \text{ (at support } R_1) &= \frac{1}{16} w l^2 \\ M_2 \text{ (when } x < l) &= \frac{w x}{16} (7l - 8x) \\ \Delta \text{ Max. (0.472 } l \text{ from } R_1) &= 0.0092 w l^4 / EI \end{aligned}$$

30. CONTINUOUS BEAM—TWO EQUAL SPANS—CONCENTRATED LOAD AT CENTER OF ONE SPAN



$$\begin{aligned} \text{Total Equiv. Uniform Load} &= \frac{13}{8} P \\ R_1 - V_1 &= \frac{13}{32} P \\ R_2 - V_2 + V_1 &= \frac{11}{16} P \\ R_3 - V_3 &= \frac{3}{32} P \\ V_1 &= \frac{19}{32} P \\ M_{\text{max. (at point of load)}} &= \frac{13}{64} P l \\ M_1 \text{ (at support } R_1) &= \frac{3}{32} P l \\ \Delta \text{ Max. (0.480 } l \text{ from } R_1) &= 0.015 P l^2 / EI \end{aligned}$$

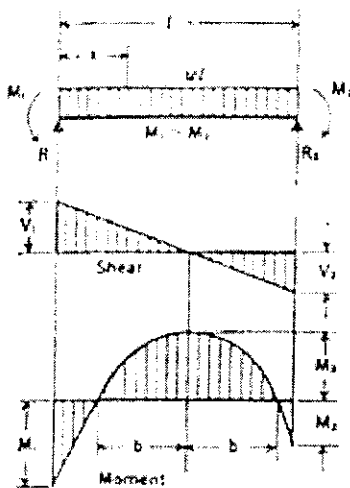
31. CONTINUOUS BEAM—TWO EQUAL SPANS—CONCENTRATED LOAD AT ANY POINT



$$\begin{aligned} R_1 - V_1 &= \frac{Pb}{4l^3} (4l^2 - a(l+a)) \\ R_2 - V_2 + V_1 &= \frac{Pa}{2l^3} (2l^2 + b(l+a)) \\ R_3 - V_3 &= \frac{Pab}{4l^3} (l+a) \\ V_1 &= \frac{Pa}{4l^3} (4l^2 + b(l+a)) \\ M_{\text{max. (at point of load)}} &= \frac{Pab}{4l^3} (4l^2 - a(l+a)) \\ M_1 \text{ (at support } R_1) &= \frac{Pab}{4l^3} (l+a) \end{aligned}$$

RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

32. BEAM—UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD AND VARIABLE END MOMENTS



$$R_1 = V_1 = \frac{wl}{2} + \frac{M_1 - M_2}{l}$$

$$R_2 = V_2 = \frac{wl}{2} - \frac{M_1 - M_2}{l}$$

$$V_x = w \left(\frac{l}{2} - x \right) + \frac{M_1 - M_2}{l}$$

$$M_x \left(\text{at } x = \frac{l}{2} + \frac{M_1 - M_2}{wl} \right)$$

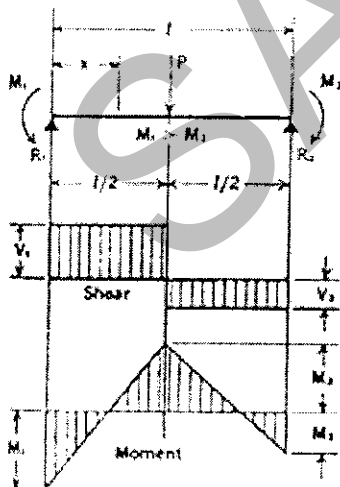
$$= \frac{wl^2}{8} - \frac{M_1 + M_2}{2} + \frac{(M_1 - M_2)^2}{2wl}$$

$$M_x = \frac{wx}{2} (l - x) + \left(\frac{M_1 - M_2}{l} \right) x - M_1$$

$$b \left(\text{To locate inflection points} \right) = \sqrt{\frac{l^3}{4} - \left(\frac{M_1 + M_2}{w} \right) + \left(\frac{M_1 - M_2}{wl} \right)^2}$$

$$\Delta_s = \frac{wl^4}{24EI} \left[x^4 - \left(2l + \frac{4M_1}{wl} - \frac{4M_2}{wl} \right) x^3 + \frac{12M_1}{w} x^2 + l^2 - \frac{6M_2 l}{w} - \frac{4M_2^2}{w^2} \right]$$

33. BEAM—CONCENTRATED LOAD AT CENTER AND VARIABLE END MOMENTS



$$R_1 = V_1 = \frac{P}{2} + \frac{M_1 - M_2}{l}$$

$$R_2 = V_2 = \frac{P}{2} - \frac{M_1 - M_2}{l}$$

$$M_s \text{ (di tengah)} = \frac{Pl}{4} - \frac{M_1 + M_2}{2}$$

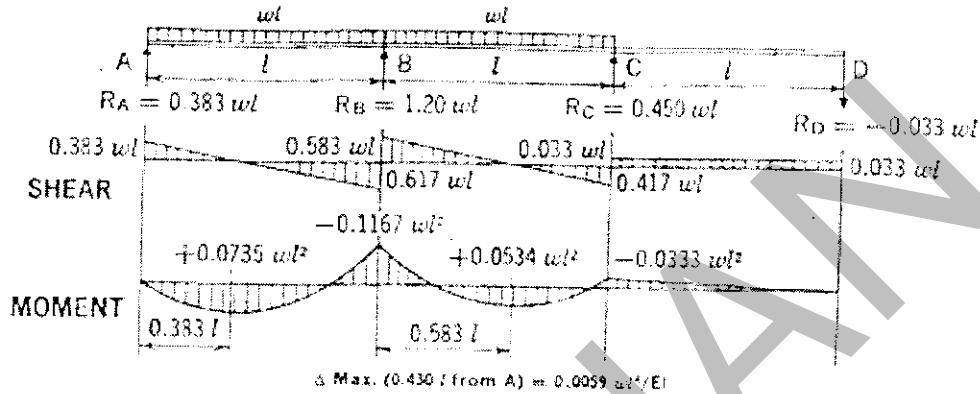
$$M_x \left(\text{jika } x < \frac{l}{2} \right) = \left(\frac{P}{2} + \frac{M_1 - M_2}{l} \right) x - M_1$$

$$M_x \left(\text{jika } x > \frac{l}{2} \right) = \frac{P}{2} (l - x) + \frac{(M_1 - M_2)x}{l} - M_2$$

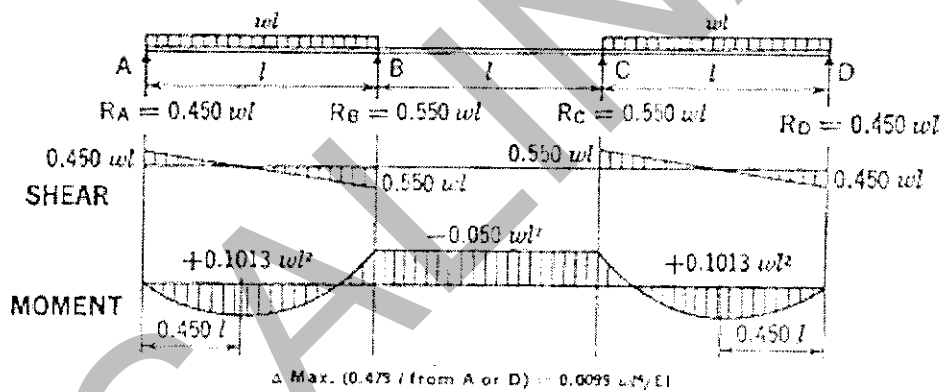
$$\Delta_s \left(\text{When } x < \frac{l}{2} \right) = \frac{Px}{48EI} \left(3l^3 - 4x^3 - \frac{6(l-x)}{Pl} (M_1(2l-x) + M_2(l+x)) \right)$$

RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

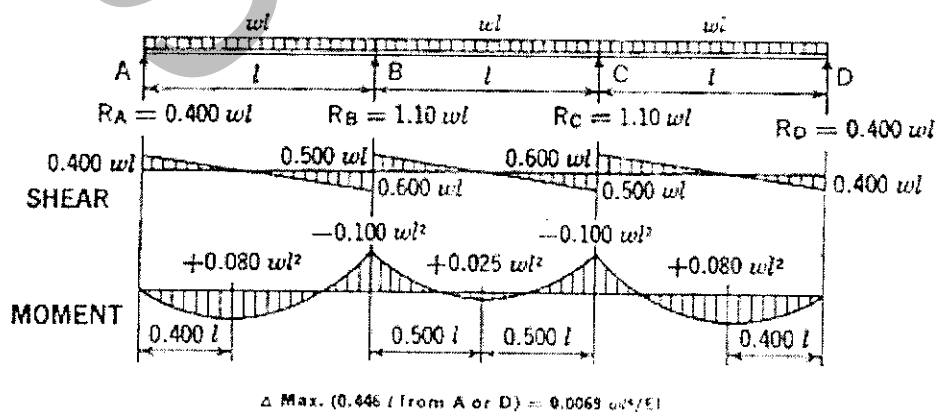
34. CONTINUOUS BEAM—THREE EQUAL SPANS—ONE END SPAN UNLOADED



35. CONTINUOUS BEAM—THREE EQUAL SPANS—END SPANS LOADED

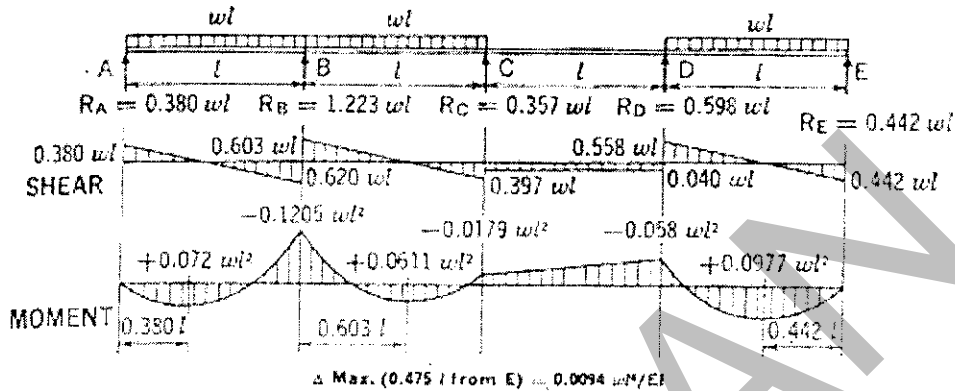


36. CONTINUOUS BEAM—THREE EQUAL SPANS—ALL SPANS LOADED

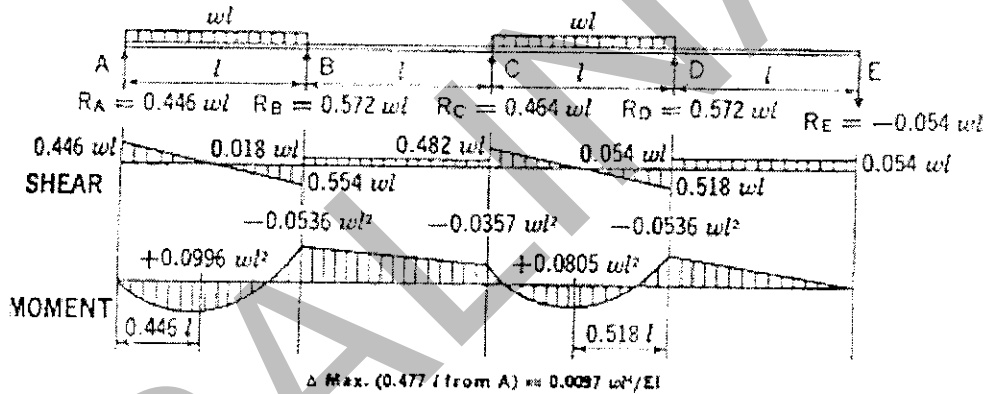


RUMUS DAN DIAGRAM BALOK Untuk berbagai kondisi pembebanan statik

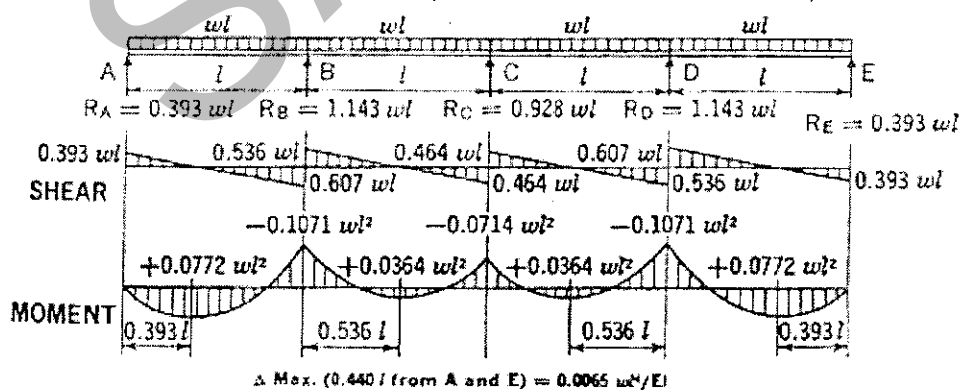
37. CONTINUOUS BEAM—FOUR EQUAL SPANS—THIRD SPAN UNLOADED



38. CONTINUOUS BEAM—FOUR EQUAL SPANS—LOAD FIRST AND THIRD SPANS



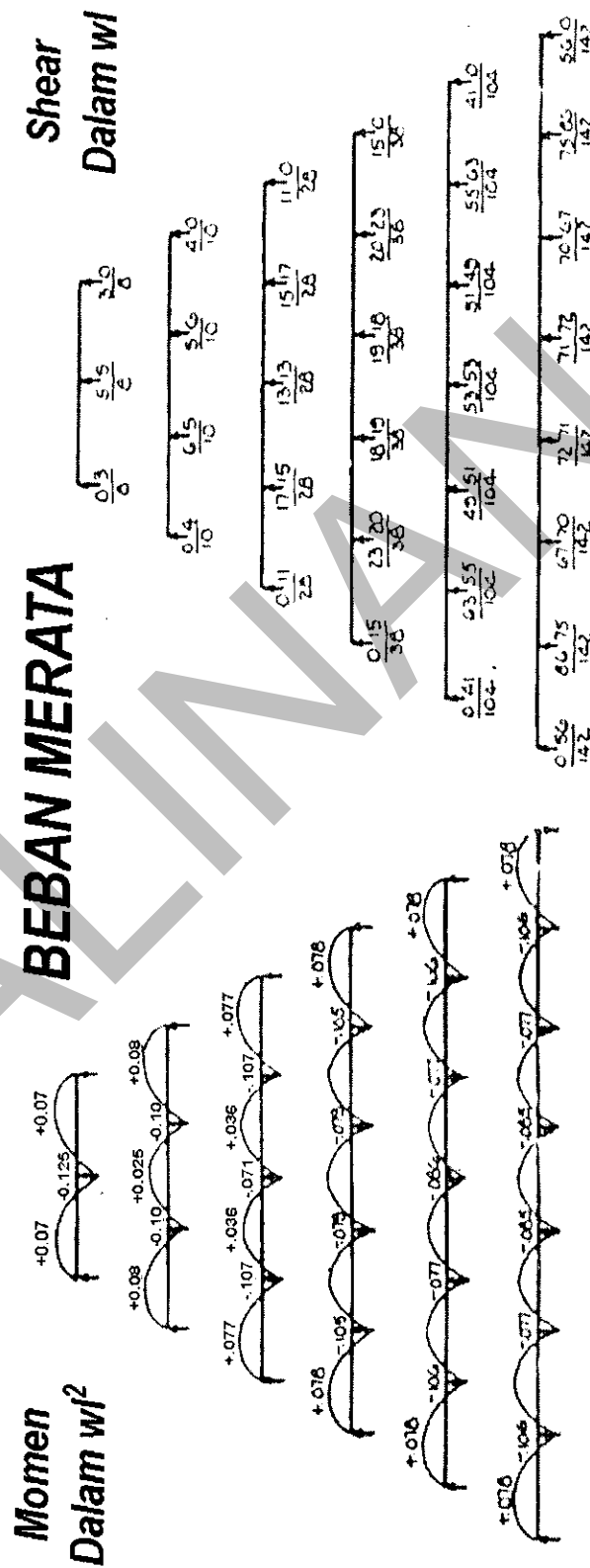
39. CONTINUOUS BEAM—FOUR EQUAL SPANS—ALL SPANS LOADED



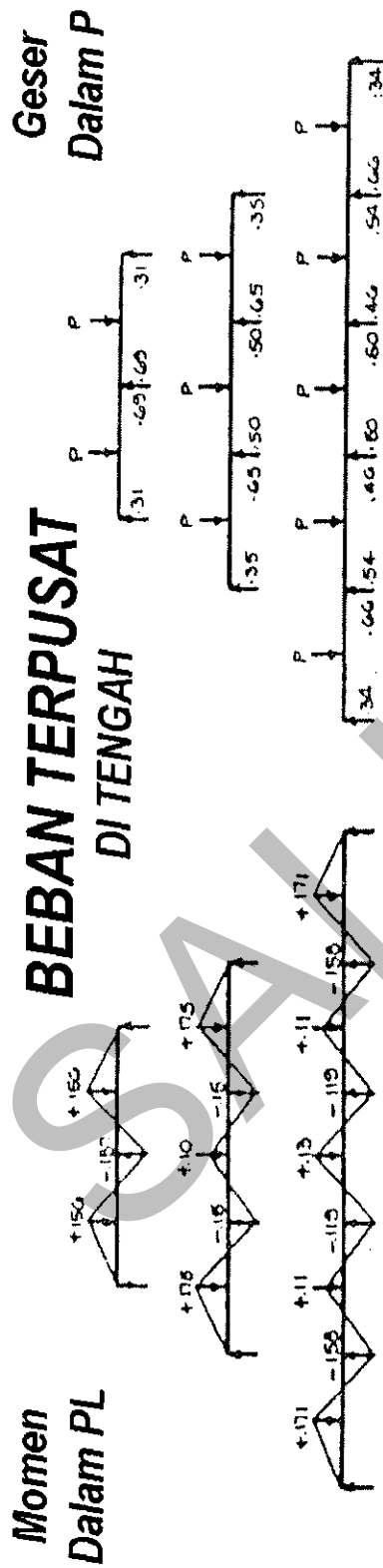
LAMPIRAN B BALOK MENERUS

Formulasi dan diagram di bawah ini dapat digunakan untuk balok dengan bentang dan beban seragam.

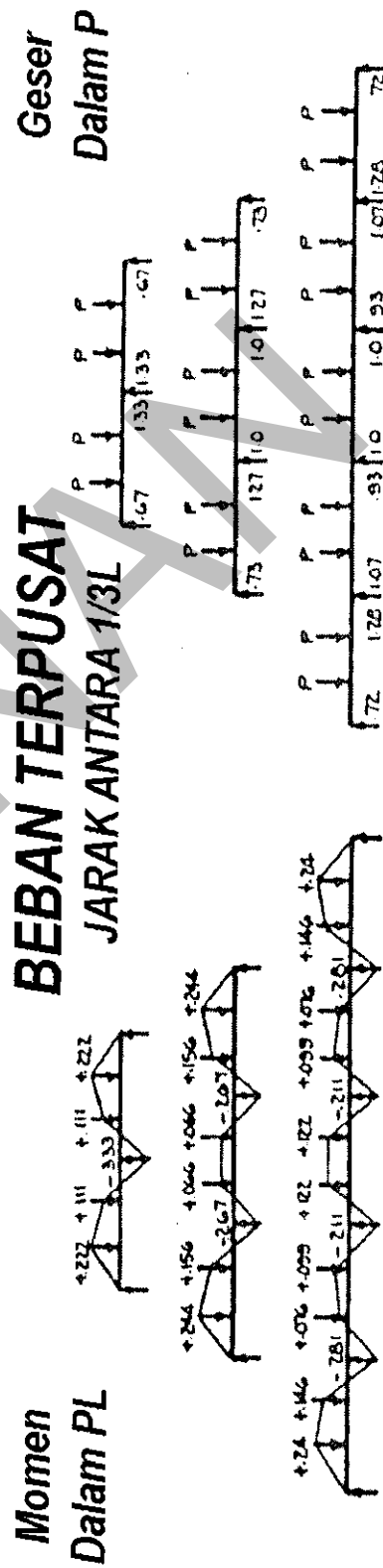
B.1 KOEFISIEN MOMEN DAN GESER UNTUK BEBAN MERATA



B.2 KOEFISIEN MOMEN DAN GESER UNTUK BEBAN TERPUSAT



B.3 KOEFISIEN MOMEN DAN GESER UNTUK BEBAN TERPUSAT DENGAN JARAK ANTARA 1/3L



B.4 KOEFISIEN MOMEN DAN GESER UNTUK BEBAN TERPUSAT DENGAN JARAK ANTARA $1/4L$

