

PEDOMAN

Konstruksi dan Bangunan

**Perkuatan struktur atas jembatan pelat berongga
dengan metode prategang eksternal**



DEPARTEMEN PERMUKIMAN DAN PRASARANA WILAYAH

Daftar isi

Daftar isi	I-ii
Prakata	iii
Pendahuluan	iv
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	2
3.1 Prategang eksternal	2
3.2 Strand	2
3.3 Blok Angker.....	2
3.4 Deviator.....	2
3.5 Selubung kabel	2
3.6 Tendon.....	2
3.7 Batang Pratekan	2
4 Sistem Prategang Eksternal	2
5 Petunjuk perencanaan	4
5.1 Blok Angker	4
5.2 Panjang kabel di belakang angker	4
5.3 Deviator.....	4
5.4 Penentuan parameter perencanaan.....	7
5.5 Analisis Perhitungan	7
5.6 Kehilangan gaya prategang.....	7
5.7 Sokongan deviator	7
6 Pelaksanaan	8
6.1 Persiapan bahan dan peralatan	8
6.2 Tahapan pelaksanaan	8
7 Kontrol kualitas	8
7.1 Bahan	8
7.2 Peralatan	8
7.3 Pelaksanaan penarikan kabel	9
8 Pemeliharaan	9
Bibliografi	10
Lampiran A (informatif) Bentuk jembatan pelat berongga	11
Lampiran B (informatif) Kabel prategang, batang baja pratekan dan selubung kabel	14
Lampiran C (normatif) Latar belakang dan parameter pemilihan jenis perkuatan	17
Lampiran D (Informatif) Contoh analisis struktur voided slab klas muatan B.M 70	18

Lampiran E (Informatif) Daftar nama dan lembaga	37
Gambar 1 Pola penempatan tendon pada struktur pelat berongga	3
Gambar 2 Contoh penempata kabel	4
Gambar 3 Blok angker ujung	5
Gambar 4 Deviator untuk perkuatan	6
Gambar 5 Bentuk Akhir Pemasangan Prategang Eksternal	6

Prakata

Perkuatan struktur atas jembatan pelat berongga dengan metode prategang eksternal dipersiapkan oleh Sub Panitia Teknik Standardisasi Bidang Prasarana Transportasi, Gugus Kerja Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan di Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Badan Penelitian dan Pengembangan, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.

Pedoman ini disusun dengan melakukan pendekatan adaptasi beberapa referensi asing dan justifikasi berdasarkan kajian litbang penerapan prategang eksternal. Penulisan pedoman ini mengikuti Pedoman BSN No. 8 tahun 2000 dibahas melalui forum konsensus yang melibatkan instansi pemerintah, direktorat jenderal, profesional, dan konsultan serta kalangan akademisi.

Pedoman diperuntukan untuk semua pihak yang terlibat dalam rehabilitasi bangunan atas jembatan, mulai dari perancang, kontraktor, dan instansi pemerintah pusat serta daerah dan disusun dengan maksud agar dapat dipergunakan sebagai acuan umum dalam melakukan peningkatan kapasitas dan daya layan jembatan melalui penerapan metode prategang eksternal.

telah diselesaikan di Bandung
pada tanggal 31 Juli 2003 d

Pendahuluan

Dalam beberapa dekade, telah terjadi peningkatan pada volume dan beban kendaraan berat yang menggunakan jalan nasional. Konsekuensinya banyak jembatan yang dibangun dengan menggunakan standar desain terdahulu tidak dapat mengatasi kebutuhan lalu lintas sekarang ini dan memerlukan pembatasan beban, perkuatan atau bahkan penggantian total. Kecenderungan ini terlihat pada negara-negara berkembang dimana ekonomi regional yang berkembang pesat. Banyak jalan-jalan kecil, yang pada mulanya dibangun untuk lalu lintas ringan, banyak digunakan untuk kendaraan berat yang tidak dibayangkan pada desain aslinya.

Memperhatikan kecenderungan tersebut, timbul kebutuhan akan metode untuk meningkatkan kapasitas jembatan dengan murah dan tanpa menyebabkan banyak hambatan terhadap lalu lintas. Metode yang bervariasi dalam memperkuat jembatan dimungkinkan dan diperlihatkan dalam sejumlah buku dan publikasi. Penerapan suatu metode perkuatan pada jembatan voided slab/pelat berongga dimaksudkan untuk memperoleh peningkatan daya layan jembatan.

Pemilik dan pengelola jaringan jalan di seluruh dunia dihadapkan pada kebutuhan untuk menjamin bahwa struktur yang mereka harus bertanggung jawabkan aman untuk pengguna dan ekonomis dalam biaya perawatan dan perbaikannya.

Sasaran dalam sudut pandang manajemen jembatan adalah untuk menjaga jembatan dalam daya layannya dengan biaya minimum.

Perkuatan prategang eksternal dilakukan dengan menggunakan dongkrak kabel yang ditempatkan pada bagian ujung dan pangkal dari suatu struktur, bagian tersebut sering dinamakan blok anker/jangkar, kemudian akibat gaya tarik itu, bagian dari struktur akan tertekan dan/atau akan tercipta suatu lawan lendut/*chamber* pada struktur secara keseluruhan.

Hal-hal yang akan diuraikan adalah mengenai : dasar metode, dasar perancangan, hal yang harus diperhatikan dalam pelaksanaan dan pemeliharaan prategang eksternal pada jembatan pelat berongga sedemikian rupa agar para pembaca mengerti manfaat sekaligus batasan penggunaan metoda ini.

Sebelum melangkah lebih jauh mengenai penerapan metode prategang eksternal pada jembatan pelat berongga akan lebih baik pembaca mengetahui keuntungan dan kekurangan penggunaan metode tersebut.

Keuntungan penerapan metode prategang eksternal adalah :

- a) tidak perlu menutup arus lalu-lintas;
- b) pelaksanaannya yang mudah dalam hal pemasangan peralatan yang digunakan;
- c) kemudahan dalam pemeriksaan kabel dan angkernya yang terpasang karena letaknya di luar struktur;
- d) kabel prategang dapat ditegang ulang;
- e) kabel prategang direncanakan untuk dapat diganti kemudian hari.

Selain keuntungan di atas terdapat juga beberapa kekurangan yaitu :

- a) harus dilakukan terlebih penelitian dahulu guna menjamin bahwa dapat memikul adanya penambahan tegangan;
- b) kabel prategang yang ditempatkan di luar menjadi lebih mudah terkena korosi dan vandalisme.

Perkuatan struktur atas jembatan pelat berongga dengan metode prategang eksternal

1 Ruang lingkup

Pedoman ini berisi prinsip-prinsip yang perlu diperhatikan dalam menerapkan penggunaan prategang eksternal pada struktur jembatan pelat berongga.

Termasuk didalamnya adalah hal-hal prinsip tentang:

1. Faktor penentu penerapan prategang eksternal
2. Perancangan penerapan prategang eksternal
3. Pelaksanaan penerapan prategang eksternal
4. Pemeliharaan struktur prategang eksternal

Sedangkan yang tidak termasuk dalam pedoman ini adalah mengenai prosedur :

1. Penilaian / assessment kondisi struktur eksisting
2. Analisis detail respon struktur

2 Acuan normatif

- SNI 03-1725-1989, *Pedoman perencanaan pembebanan jembatan jalan raya*
- SNI 06-0939-1989, *HDPE untuk plastik*
- SNI 07-0358-1989, *Peraturan umum pemeriksaan baja*
- SNI 07-6764-2002, *Spesifikasi baja struktural*
- SNI 07-1051-1989, *Kawat baja karbon tinggi untuk konstruksi beton pratekan*
- SNI 07-1154-1989, *Kawat baja tanpa lapisan bebas tegangan untuk konstruksi beton pratekan, jalinan tujuh*
- SNI 07-1155-1989, *Kawat baja tanpa lapisan bebas tegangan untuk konstruksi beton pratekan*
- SNI 07-3651.1-1995, *Kawat baja beton pratekan, Bagian 1 : Persyaratan umum*
- SNI 07-3651.2-1995, *Kawat baja beton pratekan, Bagian 2 : Kawat tarik dingin*
- SNI 07-3651.3-1995, *Baja beton pratekan, Bagian 3 : Kawat kuens (quench) dan temper*
- SNI 07-3651.4-1995, *Kawat baja beton pratekan, Bagian 4 : Pilihan*
- AASHTO M164M – 90, *High Strength Bolts for Structural Steel Joints.*
- AASHTO M169 – 83, *Steel Bars, Carbon, Cold Finished, Standard Quality.*
- ASTM A233, *Mild Steel, Arc Welding Electrode*
- ASTM A307, *Mild Steel Bolts and Nuts (Grade A)*
- AWS D1.5, *Bridge Welding Code*
- BS 4550-1978, *Compressive strength for reinstatement mortar*
- BS 4551-1980, *Flexural strength for reinstatement mortar*
- BS 6319-1984, *Slant shear bond strength to concrete*
- BS 5075-1978, *Setting time for reinstatement mortar*
- Ditjen Bina Marga-1980, *Standard Konstruksi Jembatan type pretension precast concrete voided slab*

3 Istilah dan definisi

3.1

prategang eksternal (PE)

penempatan kabel / tendon / strand atau baja prategang di bagian luar / eksternal atau dikaitkan pada struktur dalam hal ini jembatan pelat berongga

3.2

strand

kabel yang terdiri dari lilitan kawat (strand) dengan kuat tarik tinggi, strand dapat berbentuk kabel tunggal atau kabel gabungan/ tendon

3.3

blok angker

bagian tempat menambatkan kabel prategang pada struktur yang ada

3.4

deviator

suatu konstruksi yang berfungsi mengubah arah kabel dan memudahkan pembentukan alinyemen kabel, baik blok angker dan deviator ini harus dirancang dengan benar agar kabel menempel dan bekerja dengan sempurna

3.5

selubung kabel

pembungkus yang terbuat dari bahan polypropylene atau high density polyethylene (HDPE) untuk melindungi kabel dari bahaya korosi

3.6

batang pratekan

batang baja khusus dengan dimensi dan kuat bahan tertentu yang akan diberikan gaya tarik padanya

4 Sistem prategang eksternal (PE)

Keputusan untuk memilih perkuatan jembatan pelat berongga dengan menggunakan metode prategang eksternal ini harus didahului dengan suatu penilaian kondisi struktur jembatan.

Perkuatan dengan PE menyederhanakan penerapan beban aksial yang dikombinasikan dengan gaya angkat untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser dari struktur balok atau komponen. Metode dapat juga digunakan untuk meningkatkan kapasitas dan daya layan. Sebagai contoh peningkatan kekakuan yang diberikan dengan prategang eksternal dapat mereduksi defleksi dan vibrasi selama umur layannya. Jangkauan tegangan pada lokasi kritis dapat juga direduksi sehingga dapat meningkatkan kinerja ketahanan terhadap fatik. Dengan demikian kehadiran deformasi atau lendutan ke bawah akibat beban yang diterapkan pada jembatan dapat direduksi.

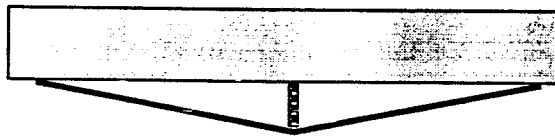
Prinsip dasar PE adalah sama seperti pada sistem prategang yang biasa dilakukan khususnya pada jembatan beton pratekan, yaitu menerapkan suatu gaya tekan yang dikombinasikan dengan momen eksentrisitas guna menambah kapasitas lentur serta memperbaiki kondisi retakan dari suatu gelagar.

Pemberian tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan kabel prategang, baik yang berupa strand tunggal maupun gabungan. Pada beberapa keadaan, pemberian tegangan dilakukan dengan menggunakan batang baja kuat tarik tinggi yang dapat ditarik dengan dongkrak hidrolik ataupun dengan sistem pengencangan baut.

Pada Gambar 1 diperlihatkan penempatan kabel yang dapat ditempatkan pada jembatan pelat berongga.



a) Tendon Eksentris

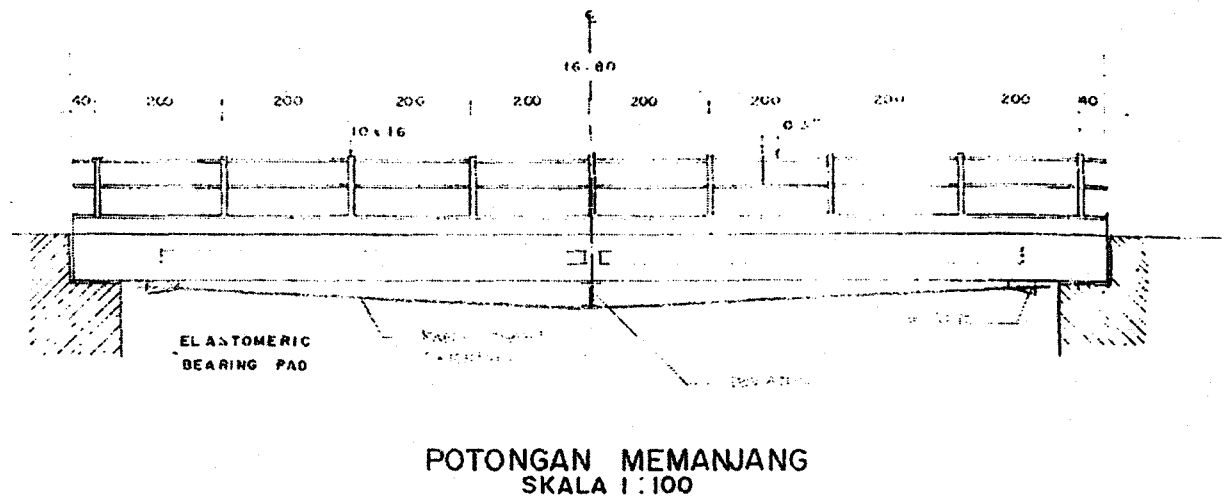


b) Tendon Poligon King Pose



c) Tendon Poligon double King Pose

Gambar 1 Pola penempatan tendon pada struktur pelat berongga



Gambar 2 Contoh penempatan kabel

5 Petunjuk perencanaan

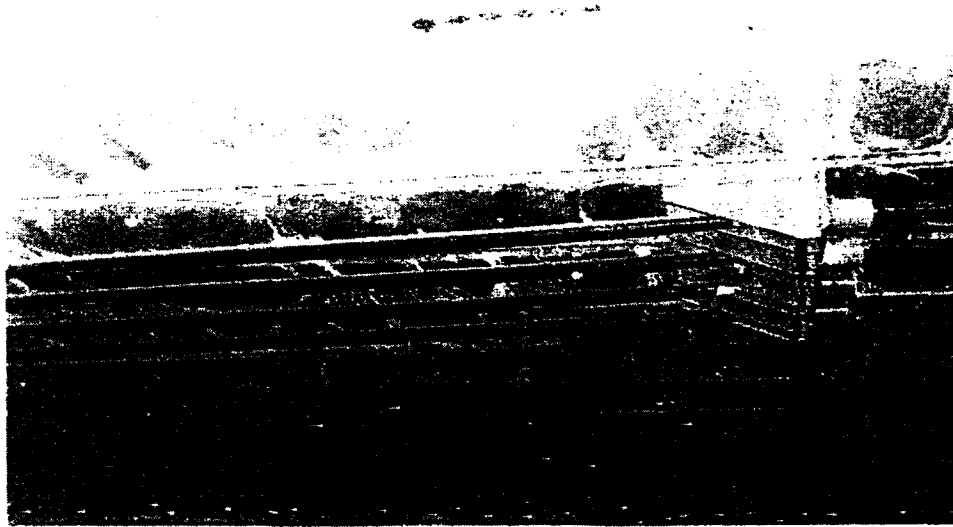
5.1 Blok angker

Sistem pengangkeran yang digunakan dalam perkuatan ini adalah sama seperti yang digunakan pada perencanaan beton prategang biasa. Saat sekarang ini produsen khusus peralatan prategang sudah menyiapkan sistem angker yang khusus untuk prategang eksternal dengan kelengkapan perlindungan terhadap korosi serta fasilitas lain yang tersedia untuk keperluan inspeksi dan penggantian strand.

Angker pada konstruksi jembatan pelat berongga, angker dapat ditempatkan ujung-ujung bawah badan pelat berongga. Tendon dapat dibuat lurus, atau poligon bergantung pada kebutuhan perencanaan.

Hal-hal penting yang harus diperhatikan berkaitan dengan perencanaan blok angker adalah sebagai berikut :

- a) angker harus direncanakan sesimetris mungkin terhadap as gelagar arah vertikal, guna menghindari terjadinya momen permanen yang tidak terimbangi pada struktur;
- b) angker hendaknya dipasang pada bagian bawah badan gelagar dan penegangannya dilakukan secara bersamaan dengan menggunakan dua buah dongkrak prategang;
- c) angker sedapat mungkin harus ditempatkan pada daerah yang mempunyai tegangan kecil, guna menghindari terjadinya tegangan yang berlebih. Apabila tegangan tarik yang terjadi pada elemen lantai yang berdekatan dengan angker melampaui batas maksimum yang diijinkan maka daerah elemen tersebut harus diperkuat.



Gambar 3 Blok anker ujung

5.2 Panjang kabel di belakang anker

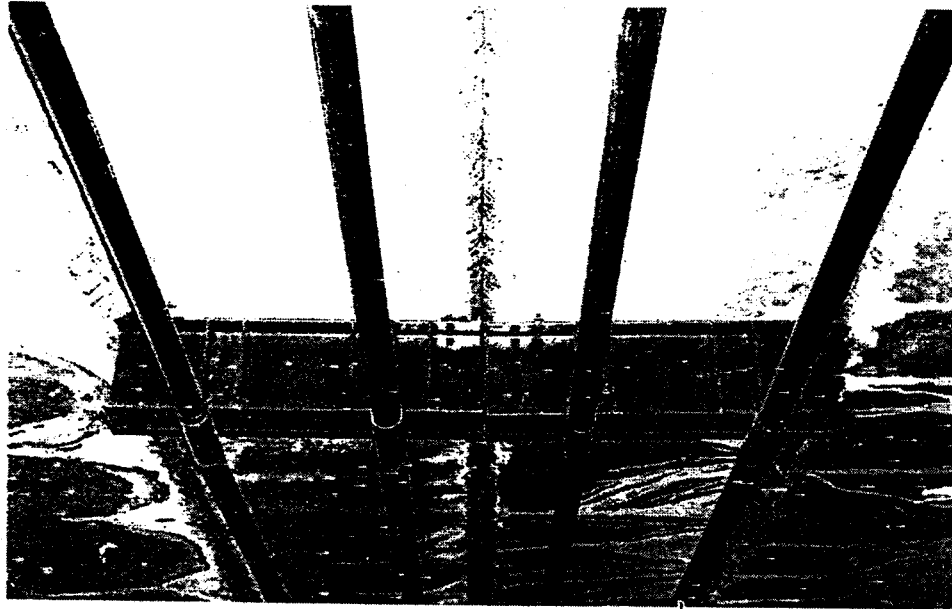
Untuk keperluan pemeliharaan, penggantian, penegangan ulang kabel, ataupun keperluan pemantauan, maka perlu direncanakan adanya kabel dengan panjang tertentu di belakang anker, minimum 50 cm. Selanjutnya kabel berlebih tersebut diberi penutup untuk menghindari korosi dan di dalamnya diisi dengan lemak.

5.3 Deviator

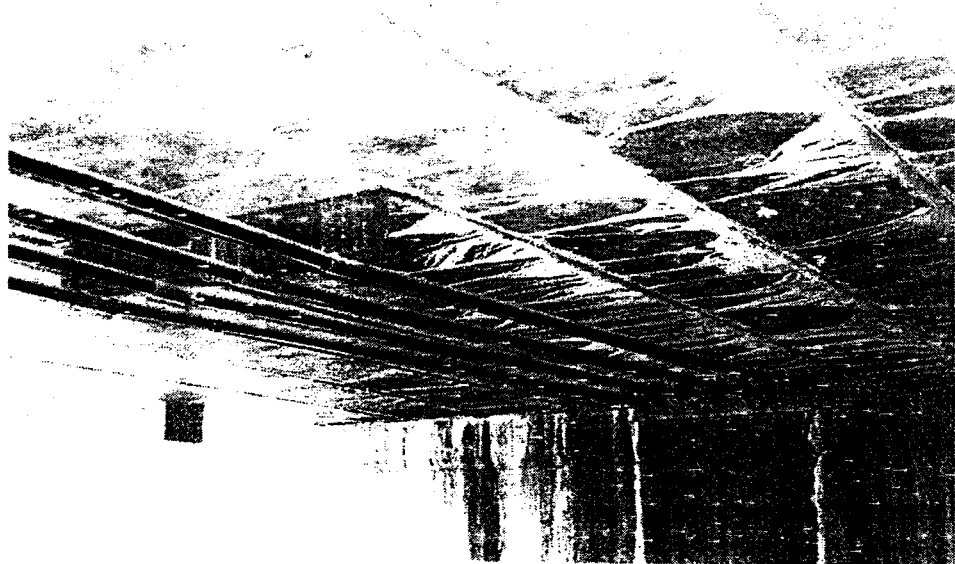
Deviator merupakan suatu unit alat bantu yang dibuat guna memudahkan pembentukan suatu profil kabel prategang yang sesuai dengan kebutuhan. Konstruksi deviator bisa direncanakan seperti contoh deviator dalam Gambar 4 atau bentuk lain sesuai kebutuhan dan memenuhi fungsinya. Diafragma yang ada dapat dimanfaatkan sebagai deviator, akan tetapi kemungkinan perlu diperkuat dahulu agar mampu menahan gaya yang bekerja pada deviator. Perkuatan diafragma dapat dilakukan dengan mempertebal konstruksi diafragma ataupun dengan perkuatan setempat dengan gaya prategang.

Hal-hal penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan deviator :

- a) Deviator harus terpasang kuat padaudukannya guna menjamin pemindahan gaya secara sempurna dan menghindari tegangan setempat yang berlebih pada deviator dan sistem penyangga.
- b) Deviator harus ditempatkan pada daerah yang mempunyai tegangan kecil guna menghindari adanya tegangan yang berlebih.
- c) Deviator harus dipasang dengan ketelitian yang cukup tinggi agar posisi kabel sesuai dengan yang disyaratkan dalam perencanaan.
- d) Deviator harus dapat menampung adanya sistem proteksi korosi kabel.
- e) Deviator harus diperkuat dengan menggunakan pelat pengaku, yang dimaksudkan selain untuk mencegah terjadinya konsentrasi tegangan yang besar, juga untuk mencegah terjadinya tekuk setempat.
- f) Pemasangan anker dan deviator umumnya dilakukan pada ruang yang relatif sempit dan terbatas. Keadaan demikian akan rentan terhadap bahaya korosi. Oleh karena itu disarankan agar jumlah anker dan deviator yang digunakan seminimal mungkin.



Gambar 4 Deviator untuk perkuatan



Gambar 5 Bentuk akhir pemasangan prategang eksternal

5.4 Penentuan parameter perencanaan

Sebagai dasar yang akan digunakan dalam menentukan perlunya perkuatan suatu gelagar jembatan lama adalah mengetahui terlebih dahulu berapa kapasitas dan daya layan yang dimiliki oleh gelagar. Kapasitas dan daya layan gelagar dalam memikul momen dan geser dapat dihitung berdasarkan data bahan dan dimensi struktur yang ada dilapangan.

Data yang digunakan untuk menghitung kapasitas dan daya layan struktur tersebut dapat diperoleh dari beberapa sumber, antara lain ;

- a) gambar pelaksanaan (as-built drawing).
- b) mutu bahan yang diperoleh dari pengujian lapangan.
- c) ukuran dan dimensi struktur yang ada dilapangan.
- d) data lalu lintas

5.5 Analisa perhitungan

Perencanaan perkuatan struktur ini harus ditinjau untuk batas daya layan (servicability limit states/SLS) dan batas ultimitnya (ultimate limit states/ULS) sesuai dengan RSNi Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan pada Bab 3 mengenai Perencanaan kekuatan struktur beton prategang.

Gaya prategang untuk sistem prategang eksternal (PE) dibatasi sebesar 45 % terhadap gaya putus. Hal ini dimaksudkan untuk mengakomodasi fatik yang disebabkan oleh getaran struktur dan getaran kabel sendiri.

5.6 Kehilangan gaya prategang

Dalam menghitung gaya prategang eksternal harus dipertimbangkan adanya kehilangan gaya prategang yang dapat dikelompokkan dalam dua kategori, yaitu :

1. terjadi seketika selama penegangan kabel. Gaya prategang dapat hilang dengan segera akibat gesekan dan slip pada anker. Gaya prategang yang telah direduksi akibat kehilangan awal disebut gaya prategang awal.
2. kehilangan akibat berjalannya waktu, terutama disebabkan oleh relaksasi. Kemudian gaya prategang yang telah direduksi akibat relaksasi disebut gaya prategang efektif.

Secara umum, kehilangan gaya prategang berpengaruh pada perilaku struktur saat dikenai beban layan seperti lendutan dan lawan lendut.

5.7 Sokongan deviator

Kadang-kadang akibat kebutuhan letak tendon yang cukup jauh dari bagian pelat berongga diperlukan sokongan. Karena itu perlu ada perancangan yang lebih detail pada bagian sokongan tersebut untuk menahan gaya-gaya sebagai berikut :

1. Gaya aksial yang menekan struktur sokongan.
2. Gaya mendatar yang didistribusikan ke baut-baut.

Ketinggian deviator ditentukan dari analisis respon struktur, yang mana semakin tinggi deviator akan semakin besar momen lawan lendutnya. Namun hal ini juga harus disesuaikan dengan kebutuhan momen. Selain itu juga harus dipertimbangkan jarak ruang bebas di bawah jembatan, dimana semakin tinggi deviator akan mengurangi ruang bebas dan semakin tinggi pula resiko terhadap benda hanyutan

6 Pelaksanaan

6.1 Persiapan bahan dan peralatan

Prosedur yang harus dipersiapkan dalam pelaksanaan adalah :

- a) Persiapan pengadaan kabel prategang dan batang baja pratekan.
- b) Persiapan blok angker, selongsong dan deviator secara pabrikasi.
- c) Persiapan dongkrak hidrolik.
- d) Persiapan peralatan-peralatan penunjang seperti generator, bor beton, gerinda tangan dan lain-lain.

6.2 Tahapan pelaksanaan

Langkah penting dalam pelaksanaan adalah :

- a) Cek kondisi lapangan, untuk mengantisipasi bahan dan peralatan penunjang apa saja yang perlu disediakan.
- b) Pasangkan struktur angker dan deviator pada gelagar baja dengan menggunakan baut.
- c) Pasang kabel prategang sampai alinyemen tendon sesuai rencana terbentuk
- d) Lakukan penegangan atau penarikan kabel secara bertahap
- e) Kontrol pengaruh penegangan pada batang baja.
- f) Jika didapatkan adanya perubahan berupa retakan pada pelat lantai jembatan, hentikan penegangan, kemudian hitung dan rencana kembali
- g) Lakukan pemotongan strand di belakang angker sampai mempunyai panjang minimum 50 cm.
- h) Lindungi angker dan deviator dari pengaruh korosi.
- i) Tutup bagian angker dengan kotak penutup dari pelat baja kemudian masukan gemuk ke dalamnya

7 Kontrol kualitas

7.1 Bahan

Bahan-bahan untuk prategang eksternal harus sesuai dengan spesifikasi pada Butir 2. Kabel prategang dan pelat penyusun deviator dan angker blok sebaiknya diuji tarik sesuai dengan ketentuan uji tarik untuk mendapatkan beban leleh, beban ultimit dan elongasi.

7.2 Peralatan

Kontraktor wajib menyediakan semua peralatan utama dan pendukung untuk pelaksanaan prategang eksternal. Dongkrak hidrolik yang dipakai harus telah dikalibrasi dengan menunjukkan bukti sertifikat kalibrasi yang dikeluarkan oleh lembaga berwenang dan belum digunakan untuk pekerjaan lain. Dongkrak hidrolik juga harus dilengkapi dengan alat pengukur tekanan hidrolik (manometer) sehingga dapat diketahui besarnya gaya penarikan kabel. Kontraktor juga harus menyediakan peralatan cadangan untuk mengantisipasi kerusakan salah satu dongkrak.

Alat las yang digunakan harus dalam kondisi baik sehingga dapat menghasilkan arus sesuai dengan kebutuhan dan hasil penetrasi las sesuai dengan persyaratan yang tertuang dalam gambar rencana.

7.3 Pelaksanaan penarikan kabel

Setelah angker dan deviator terpasang, maka kabel prategang yang sudah dilindungi terhadap karat dengan selongsong polypropelene, dipasang pada pelat berongga sesuai dengan gambar rencana. Setiap kabel diberi gaya prategang awal sebesar 50 % gaya rencana. Tahapan penarikan dimulai dari sisi terluar dilanjutkan pada kabel sisi dalam pada setiap pelat berongga. Hal ini dimaksudkan agar jembatan tidak mengalami deformasi berlebihan.

Setelah semua kabel ditarik sebesar 50 %, maka dilanjutkan sampai 100 % gaya rencana dengan urutan seperti di atas. Selama penarikan kabel perlu dilakukan kontrol terhadap :

- a) Gaya prategang yang dibaca melalui manometer yang terpasang pada dongkrak
- b) Elongasi kabel yang terjadi pada setiap penarikan untuk memeriksa apakah terjadi elongasi berlebih atau tidak
- c) Kontrol terhadap lendutan vertikal jembatan selama dan sesudah penarikan kabel.
- d) Amati perubahan pada struktur jembatan terhadap perilaku lendutan yang ada

8 Pemeliharaan

Prosedur yang harus diperhatikan dalam pemeliharaan adalah :

- a) lakukan pemeriksaan rutin setiap setahun sekali
- b) periksa tegangan-tegangan pada kabel, guna menjamin bahwa sistem masih dalam fungsinya.
- c) lindungi kabel, angker, serta deviator dari pengaruh air agar tidak terkena korosi.
- d) kabel harus diberi perlindungan terhadap korosi sepanjang umur rencananya, termasuk selama jangka waktu sebelum pemasangannya.
- e) hindarkan pengaruh kebakaran yang mungkin terjadi pada kabel/tendon.
- f) tendon atau kabel harus selalu dalam keadaan tertutup, oleh karena itu lapisan pelindung harus selalu dijaga keutuhannya.
- g) kabel di dalam selongsong harus diinjeksi dengan bahan parafin, gemuk atau semen yang akan berfungsi sebagai penghalang fisik terhadap air dan bahan pencemar lainnya.
- h) karena semen bersifat kaku, padat dan merekat erat pada kabel, sehingga menimbulkan kesulitan dalam pemeriksaan keutuhan kabel ataupun kesulitan sewaktu diperlukan penggantian kabel maka penggunaan bahan injeksi dengan semen pada perkuatan PE tidak disarankan.
- i) gunakan perlindungan korosi lain seperti lak-band, cat atau bahan pelapis yang sejenis untuk perbaikan kerusakan setempat dan menutup sambungan antara ujung selubung dengan kabel.
- j) apabila karat sudah terjadi maka kabel harus diganti dan dilakukan penegangan kembali pada tempat yang sama dengan kabel yang baru.
- k) kepala angker harus dilindungi dengan cara menutupnya dengan penutup kotak yang di dalamnya diisi gemuk.
- l) periksa kepala angker dan deviator dari bahaya karat, dan jika sudah terjadi lakukan perbaikan dengan cara perkuatan

Bibliografi

Pusat Litbang Teknologi Prasarana Jalan, Badan Litbang Departemen Kimbangwil, Brosur Perkuatan Jembatan dengan Metode Prategang Eksternal ,1999

Wardhana, P.K dan tim, " Aplikasi Perkuatan Jembatan Rangka Baja ", Laporan Penelitian Puslitbang Prasarana Transportasi, Badan Litbang Departemen KimPrasWil, 2002

Witamawan, W. dan tim, Perkuatan Jembatan Lama, Laporan Pengembangan Puslitbang Teknologi Prasarana Jalan, Badan Litbang Departemen KimBangWil, 2000

Troistsky, M.S., Prestressed Steel Bridges Theory and Design, Van Nostrand Reinhold Company, 1990,

Daly, A.F. , dan Witamawan, W. , A Method for Increasing The Capacity of Short and Medium Span Bridges, www.trl.co.uk

Lampiran A (Informatif)

Bentuk jembatan pelat berongga

Jembatan Voided Slab (pelat berongga) merupakan jenis beton prategang pretension. Beton prategang pretension pada dasarnya merupakan struktur beton dimana tegangan-tegangan internal yang terjadi pada beton yang dapat melawan tegangan-tegangan yang terjadi akibat beban luar sampai pada tingkat yang diinginkan.

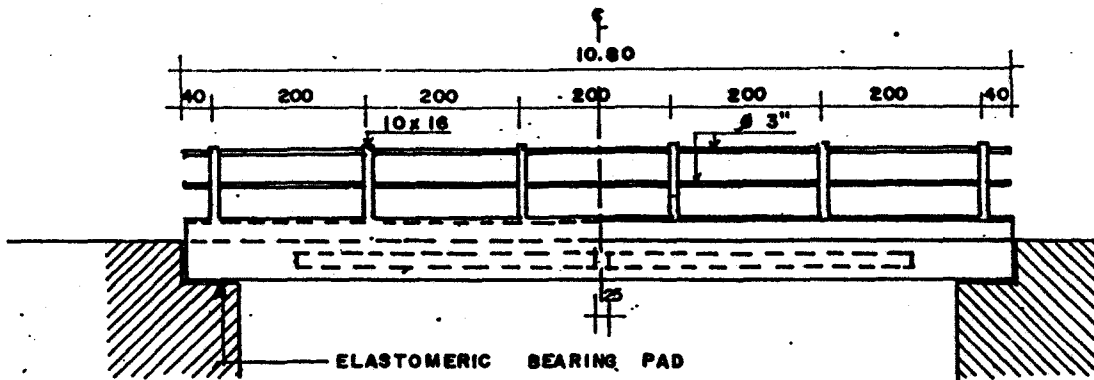
Beton prategang pretension, tendon terlebih dahulu ditarik antara blok-blok angkur yang kaku dan dicetak diatas tanah dalam bentuk cetakan pretarik. Beton di cor pada cetakan yang di dalamnya terdapat baja (strand) yang sudah ditegangkan lebih dahulu. Kemudian setelah beton mencapai kekuatan tertentu strand yang telah mengalami tegangan tersebut dipotong, sehingga memberikan tekanan pada beton. Metoda ini bersandarkan pada rekatan yang timbul antara baja dan beton di sekelilingnya sehingga merekatnya beton dengan tendon sepanjang badan merupakan hal yang terpenting. Untuk produksi massal elemen prategang, pada umumnya dipakai proses rangkaian panjang yang dikembangkan oleh Hoyer. Dengan metoda ini, kawat-kawat direntangkan antara dua turap yang berjarak beberapa ratus meter yang sedemikian rupa sehingga jumlah unit yang sama dapat dicetak sepanjang kelompok kawat tegangan yang sama. Penarikan diberikan dengan dongkrak hidraulik atau dengan mesin penegang yang dapat dipindahkan. Kawat atau strand yang ditarik secara tunggal maupun kelompok pada umumnya diikat pada tumpuannya dengan pasak baja.

Transfer prategang ke beton biasanya dilaksanakan dengan dongkrak hidrolik atau dongkrak sekrup yang besar, dimana semua kawat dilepas secara bersamaan setelah beton mencapai kekuatan tekan yang disyaratkan.

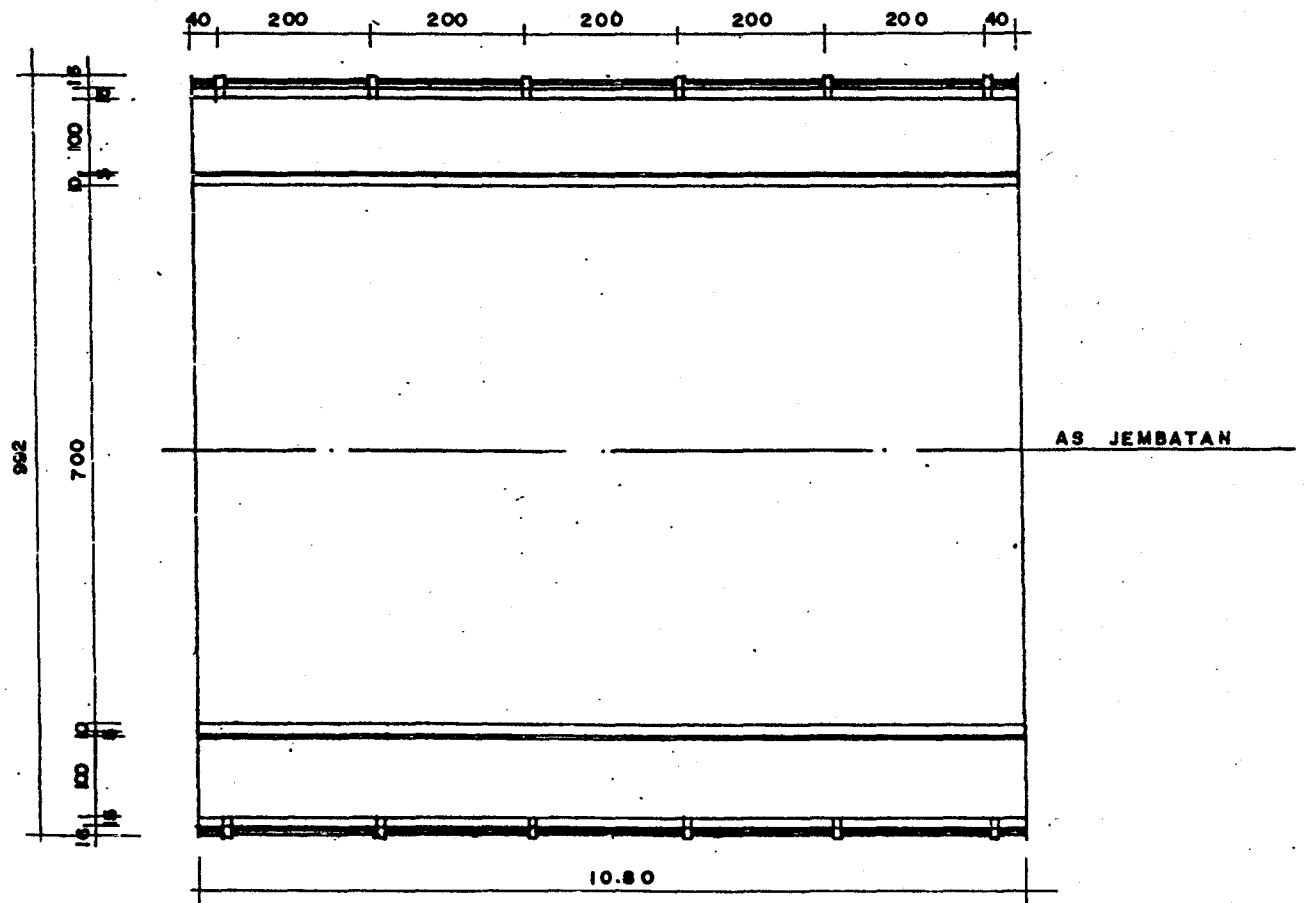
Jembatan pelat berongga/ voided slab merupakan jembatan pretensioned precast Concrete yang apabila merujuk pada standar bangunan atas jembatan Direktorat Jendral Bina Marga (kini Direktorat Jendral Prasarana Wilayah) kapasitasnya adalah untuk 100 % dan 70 % muatan Bina Marga. Dengan kata lain muatan yang digunakan untuk perhitungan standar bangunan atas adalah :

1. Kelas muatan B.M. 100, yaitu 100% muatan "D" dan 100% muatan "T"
2. Kelas muatan B.M. 70, yaitu 70% muatan "D" dan 70% muatan "T"

Panjang bentang jembatan tipe ini adalah 5 m sampai dengan 16 m. Untuk contoh gambar teknis dan Ketentuan teknis pelat berongga/ voided slab dapat dilihat pada Gambar A.1

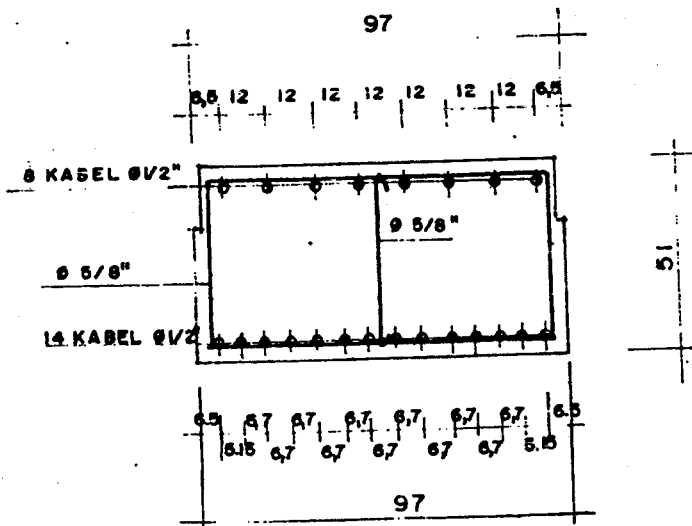
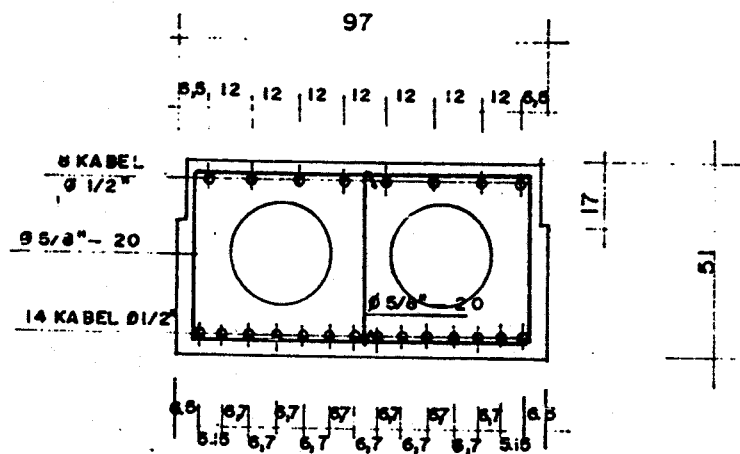
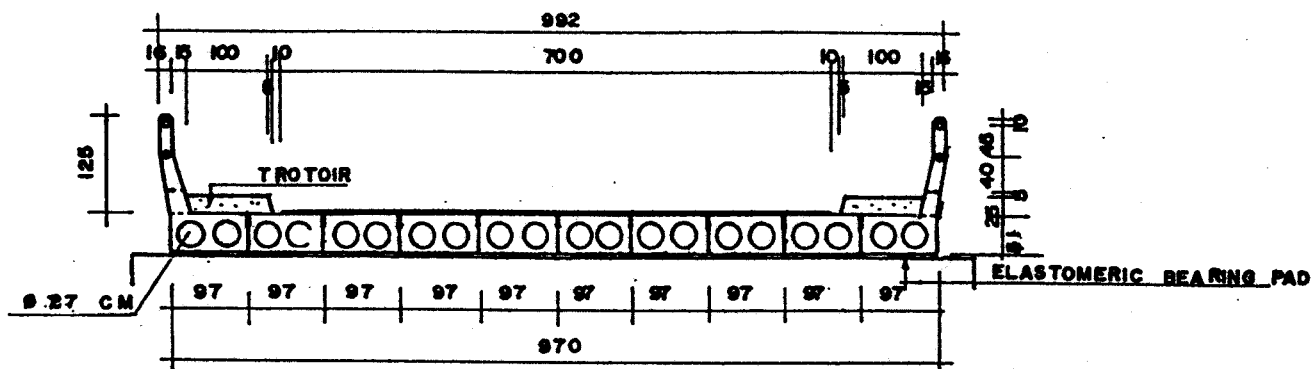


POTONGAN MEMANJANG
SKALA 1 : 100



D E N A H
SKALA 1 : 100

Gambar A.1 Contoh standar jembatan pelat berongga



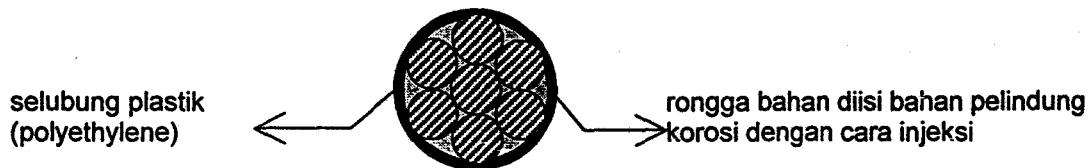
Gambar A.1 Contoh standar jembatan pelat berongga (lanjutan)

Lampiran B (Informatif)

Kabel prategang, batang baja pratekan dan selubung kabel

Seperti telah disinggung di muka, pemberian tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan kabel prategang, baik yang berupa strand tunggal maupun gabungan. Setiap strand yang digunakan dalam PE harus dilindungi terhadap bahaya korosi dengan cara memasukkannya ke dalam selubung *polyethylene* yang diisi dengan bahan pelindung korosi. (lihat Gambar B.1). Karakteristik dari strand dapat dilihat pada Tabel B.1 dan B.2.

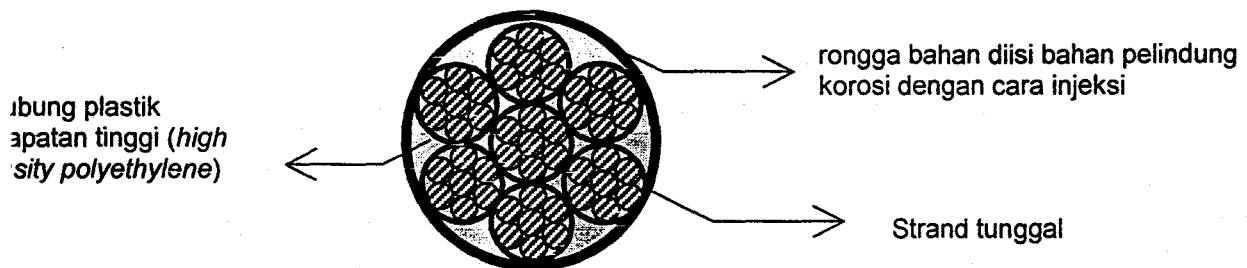
B.1 Strand Tunggal



Gambar B.1 Strand tunggal dengan selubung proteksi korosi

B.2 Strand Gabungan

Pada tendon yang terdiri dari beberapa strand, setiap strand tidak perlu dilindungi terhadap bahaya korosi sebagaimana pada strand tunggal. Sebagai gantinya strand-strand tersebut dapat dilindungi dengan galvanisasi atau dengan memasukkannya kedalam selubung untuk kemudian diisi dengan bahan pelindung korosi. (lihat Gambar B.2)



Gambar B.2 Strand gabungan dengan selubung proteksi korosi

Tabel B.1 Karakteristik *strand*

TIPE STRAND	ASTM GRADE 270	
	13 mm (0,5")	15 mm (0,6")
diameter (mm)	12,7	-
luas nominal (mm ²)	98,7	140
berat nominal (kglm)	0,775	1,1
tegangan leleh (MPa)	1670	1670
tegangan tarik putus (MPa)	1860	1860
batas leleh (kN)	183,7	260,7
modulus (GPa)	sekitar 195	sekitar 195
Relaksasi (%)	maksimum 2,5	Maksimum 2,5

Catatan : Tegangan ijin 45 % dari tegangan leleh

B.3 Batang Baja

Batang baja biasanya digunakan apabila panjang struktur yang akan ditegangkan relatif pendek dan akan dipasang lurus. Batang baja ini tersedia dalam berbagai ukuran, mulai, dari diameter 15 mm sampai dengan 75 mm, dengan panjang sampai 18 meter. Karakteristik batang baja kuat tarik tinggi dapat dilihat pada Tabel B.2.

Tabel B.2 Karakteristik batang baja kuat tarik tinggi

Diameter Batang nominal	Jarak ulir (mm)	Diameter utama Dari ulir (mm)	Berat per meter (kg)	Beban putus ultimit minimal	
				Regular grade	Super grade
15	2	16,50	1,58	-	190
19	2	20,32	2,47	-	305
*23	2	24,00	3,55	430	450
26	2	27,13	4,49	545	570
*29	2	30,02	5,55	680	710
*32	3	33,73	6,71	830	870
35	3	36,57	7,99	990	1040
*38	3	39,63	9,38	1175	1230

* diameter batang yang lazim digunakan

Selain dari batang baja kuat tarik diatas tersedia juga batang baja tahan karat dengan panjang sampai 18 meter, namun dengan biaya 5 sampai 6 kali lebih mahal. Sementara itu baja yang digalvanisasi tidak direkomendasikan untuk digunakan, mengingat masalah peregangan karena hydrogen.

Untuk keperluan pelat penahan angker, cincin dan mur dapat dilihat dalam Tabel B.3

Tabel B.3 Pelat penahan angker, mur, cincin dan baut

Diameter batang nominal	Dimensi pelat angker			Diameter luar dari kepala	Diameter dalam dari selubung	Diameter lubang	Berat pelat	Dimensi mur				Cincin	
								pelat melintang	Tinggi Standar	Tinggi kunci	Berat mur	Cincin rata dia. luar t = 5 mm	Cincin pegas t = 5 mm
	mm	mm	m	mm	mm	mm	kg	kg	kg	kg	mm	mm	
	A	B	C	D	E	G		H	I	J	K		
15	75	75	25	35	36	20	1,20	28	22	20	0,12	41	40
19	100	100	32	35	36	24	2,40	32	25	20	0,15	41	45
23	130	130	38	38	39	27	4,25	38	33	20	0,20	51	45
26	130	130	38	38	39	30	4,25	42	38	20	0,25	57	50
29	150	130	38	38	39	33	6,12	47	43	20	0,37	64	56
32	150	130	50	43,5	45	35	7,81	52	48	25	0,52	70	64
35	150	150	50	43,5	45	38	9,01	56	53	25	0,60	76	70
38	180	150	50	48	50	44	10,81	64	58	25	0,93	83	75

B.4 Selubung kabel

Selubung kabel terbuat dari plastik berbahan *polyethylene* atau *polypropylene*, yang berguna untuk melindungi kabel terhadap korosi sehingga harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a) Kuat menahan kerusakan yang mungkin terjadi selama fabrikasi, transportasi, pemasangan dan penegangan.
- b) Kedap terhadap air pada keseluruhan panjang tendon.
- c) Mempunyai kestabilan kimiawi untuk tahan terhadap peregangan atau pelunakan di dalam suatu rentang temperatur dan pengaruh lingkungan selama umur dari sistem perkuatan.
- d) Tidak bersifat reaktif terhadap baja, beton, bahan injeksi atau bahan pengisi celah.
- e) Untuk lingkungan yang korosif, maka ketebalan selongsong minimal 1 mm.
- f) Diameter dalam harus 2,5 mm atau lebih besar dari dimensi strand maksimum.

**Lampiran C
(normatif)**

Latar belakang dan parameter pemilihan jenis perkuatan

C.1 Latar belakang kebutuhan akan perkuatan

Latar belakang kebutuhan akan perkuatan adalah :

1. Pertumbuhan yang cepat dalam volume dan beban kendaraan yang menyebabkan harus dilakukan usaha untuk peningkatan kapasitas pemikulan dan daya layan
2. jembatan untuk menjamin jembatan yang dikelola memenuhi persyaratan keamanan dan ekonomis dalam biaya perawatan dan perbaikannya.
3. Banyak jembatan mengalami penurunan kinerja/ *deterioration* atau kerusakan yang mana mengganggu perilaku struktur jembatan itu.

C.2 Parameter penentu pemilihan jenis perkuatan

Parameter yang menentukan penerapan suatu prategang eksternal adalah :

1. Kesesuaian antara besarnya peningkatan kapasitas, daya layan jembatan eksisting yang diharapkan dengan biaya yang harus dikeluarkan termasuk biaya pemeliharannya
2. Umur rencana yang diharapkan pada jembatan
3. Ketahanan komponen jembatan yang direhabilitasi dan kemudahan untuk diinspeksi dimonitor, diganti dan kemungkinan untuk ditingkatkan lebih jauh di kemudian hari.
4. Gangguan pada lalu-lintas dan penampakan jembatan yang akan timbul setelah diperkuat

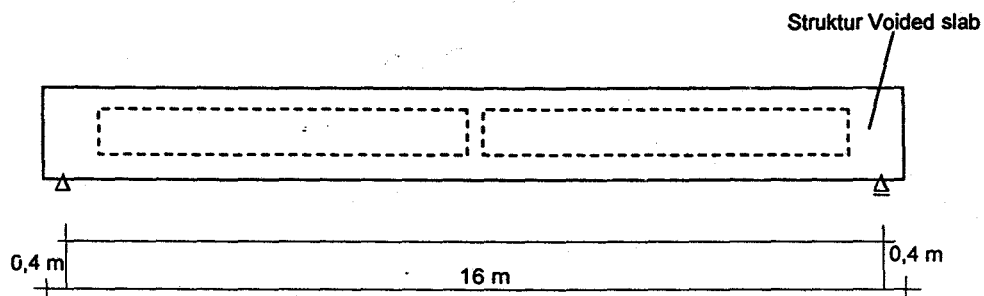
Lampiran D
(Informatif)

Contoh analisis struktur voided slab klas muatan B.M 70

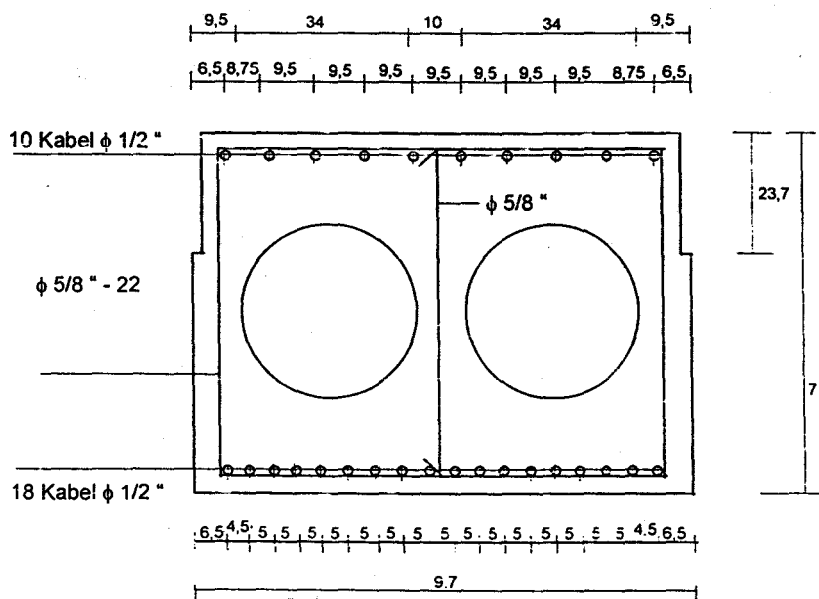
Kekuatan struktur voided slab dianalisis dengan kapasitas lentur penampang. Kekuatan lentur struktur voided slab dapat ditentukan dengan cara perencanaan keadaan batas runtuh *ultimate* dan cara perencanaan kemampuan layan *serviceability*.

Data-data struktur jembatan

- Potongan Memanjang



- Potongan Melintang



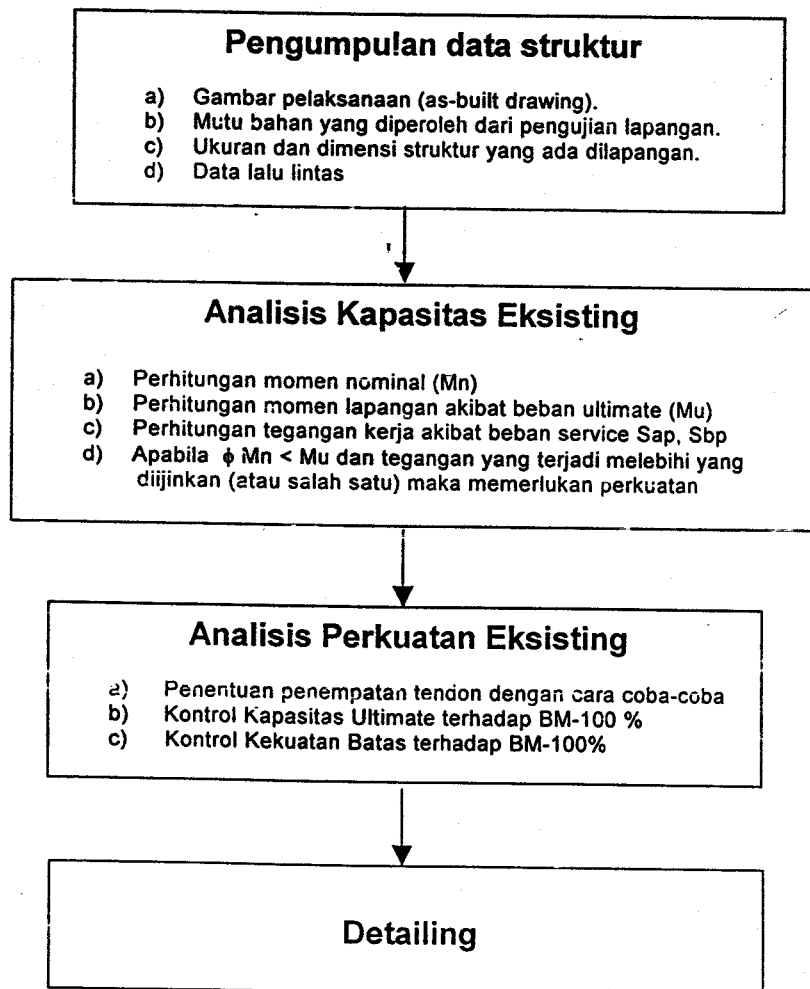
Pembebanan

Pembebanan yang digunakan adalah menggunakan Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan BMS-1992 bagian-2.

Faktor beban yang digunakan :

- ◆ Berat Sendiri pelat beton berrongga = 1.3
- ◆ Berat sendiri aspal = 2
- ◆ Berat sendiri air = 2
- ◆ Beban Hidup ("D" dan "T") = 2

Tahapan analisis yang dilakukan :



Analisis Kapasitas Lentur Ultimate

Perhitungan dengan metode " Ultimate Design "

Asumsi-asumsi :

- a. Tulangan tekan meeleleh
- b. Keseimbangan gaya-gaya :
 1. Gaya baja prategang tekan (N_{D1}) dan Sebagian baja prategang tarik (N_{T1})
 2. Gaya tekan beton (N_{D2}) dan Sebagian baja prategang tarik (N_{T1})
- c. Regangan maksimum baja = 0,035

Resume material voided slab :

- Beton

$$f_c' = 350 \text{ kg/cm}^2 = 35 \text{ Mpa}$$

$$f_{ci}' = 280 \text{ kg/cm}^2 = 28 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2 = 240 \text{ Mpa}$$

- Kabel prestress

$$\text{Diameter strand} = 1/2" = 1/2 (25,4 \text{ mm}) = 12,7 \text{ mm}$$

Luas penampang baja prategang (tarik)

$$A_{ps} = 18 \times \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 12,7^2 \right) = 2280,184 \text{ mm}^2$$

Luas penampang baja prategang (tarik)

$$A_{ps}' = 10 \times \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 12,7^2 \right) = 1266,769 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{ultimit \text{ strand } \phi 1/2"} = f_{pu} = 189,8 \text{ kg/mm}^2 = 1898 \text{ Mpa}$$

$$\text{Gaya pratekan mula-mula per strand } \phi 1/2" = 13100 \text{ kg}$$

Modulus Elastisitas Baja Prategang

$$E_{ps} = 1,96 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 = 1,96 \cdot 10^5 \text{ Mpa}$$

Manual Perhitungan Jembatan Voided Slab Bentang L = 16 m

Pendekatan nilai tegangan sewaktu kuat momen nominal dicapai, dengan mengabaikan tulangan non prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_p \rho_p f_{pu}}{\beta_1 f_c'} \right)$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d} = \frac{2280,184}{970 \cdot 665} = 0,0035$$

$$f_{se} = 1310 \text{ Mpa} > \frac{1}{2} f_{pu} = \frac{1}{2} (1898) = 949 \text{ Mpa}$$

untuk $f_c' = 35 \text{ Mpa}$, $\beta_1 = 0,81$
 untuk strand yang *stress relieved* :

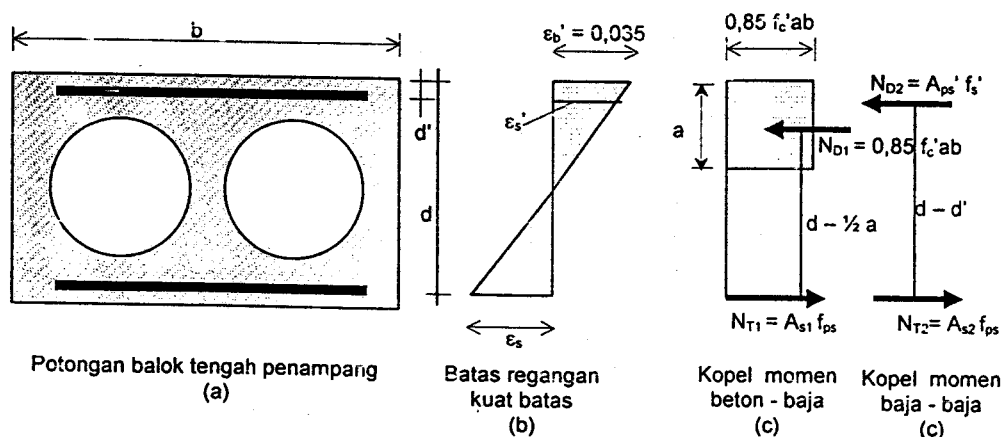
$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} \geq 0,85 \text{ dan } \gamma_p = 0,40$$

$$\text{sehingga } f_{ps} = 1898 \left(1 - \frac{0,40 (0,0035) (1898)}{0,81 (35)} \right) = 1720,104 \text{ Mpa}$$

Pemeriksaan daktilitas penulangan

$$\omega_p = \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f_c'} = \frac{0,0035 \cdot 1720,104}{35} = 0,172 \leq 0,36 \beta_1 = 0,36 (0,81) = 0,292$$

Perhitungan momen nominal :



Gambar D.1 Analisis balok voided slab

Dimana :
 $d = 665 \text{ mm}$
 $d' = 45 \text{ mm}$

Asumsi bahwa semua tulangan prategang telah meluluh, maka $f'_s = f_{ps}$ dan $f_s = f_{ps}$ dengan demikian

$$\begin{aligned} A_{ps2} &= A_{ps}' \\ A_{ps} &= A_{ps1} + A_{ps2} \end{aligned}$$

Maka, gaya tarik maksimum yang terjadi pada baja setelah dikurangi akibat adanya baja tekan T_1

$$\begin{aligned} A_{ps1} &= A_{ps} - A_{ps}' \\ &= 2280,184 - 1266,769 \\ &= 1013,415 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 &= A_{ps1} \cdot f_{ps} \\ &= 1013,415 \cdot 1720,104 \\ &= 1743179,195 \text{ N} \end{aligned}$$

dari pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik, tinggi blok tegangan tekan beton dapat dihitung sebagai berikut :

$$a = \frac{A_{ps1} \cdot f_{ps}}{(0,85 f'_c) b} = \frac{1013,415 \cdot 1720,104}{(0,85 \cdot 35) 970} = 60 \text{ mm} \leq 0,423 d = 0,423 (665) = 281 \text{ mm}$$

Dengan menggunakan anggapan sama dengan yang dipakai pada balok bertulangan prategang tarik saja tentang hubungan antara tinggi blok tegangan beton tekan dengan jarak garis netral penampang balok terhadap serat tepi tekan ($a = \beta_1 c$), maka letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan-regangan tulangan prategang baja.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{60}{0,81} = 75 \text{ mm}$$

Pemeriksaan regangan-regangan tulangan baja prategang dengan berdasarkan segi tiga sebangun, untuk mengetahui apakah asumsi yang digunakan benar, yang berarti bahwa kedua penulangan baik tulangan prategang tekan ataupun tulangan prategang tarik telah luluh sebelum beton hancur

Regangan yang diperhitungkan terjadi pada saat dicapai momen ultimit :

$$\epsilon_{ps}' = \frac{f_{ps}}{E_{ps}} - \frac{c - d'}{c} (0,003) = \frac{1720,104}{1,96 \cdot 10^5} - \frac{(75 - 45)}{75} (0,003) = 0,0075$$

$$\epsilon_{ps} = \frac{f_{ps}}{E_{ps}} + \frac{d - c'}{c} (0,003) = \frac{(665 - 75)}{75} (0,003) = 0,035$$

$$\epsilon_{py} = 0,035$$

Karena $\epsilon_{ps} < \epsilon_{py} < \epsilon_{ps}'$, maka tulangan baja prategang tarik telah meluluh tetapi baja prategang tekan belum. Dengan demikian, ternyata anggapan-anggapan pada langkah awal tidak benar. Maka nilai f_{ps} untuk M_{n1} adalah $f_{psa} = \epsilon_{psa} \cdot E_{ps} = 0,0075 \times 1,96 \cdot 10^5 = 1470$

Perhitungan momen nominal

Dari pasangan kopel beton tekan dengan tulangan baja prategang tarik

$$\begin{aligned}
 M_{n1} &= \dot{A}_{ps1} \cdot f_{psa} \left(d_p - \frac{1}{2}a \right) \\
 &= 1013,415 \times 1470 \left(665 - \frac{1}{2}(60) \right) \\
 &= 9,46 \cdot 10^8 \text{ N mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{n2} &= A_{ps'} \cdot f_{ps} (d_p - d_p') \\
 &= 1266,769 \cdot 1720,104 (665 - 45) \\
 &= 1,351 \cdot 10^9 \text{ N mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= M_{n1} + M_{n2} \\
 &= 9,46 \cdot 10^8 + 1,351 \cdot 10^9 \\
 &= 2,297 \cdot 10^9 \text{ N mm}
 \end{aligned}$$

Analisis Momen Lapangan

Mengetahui momen lapang akibat kondisi beban ultimate (Pembebanan BMS tahun 1992) dan beban serviceability, kemudian mengontrol kekuatan struktur voided terhadap momen ultimit. Bila $M_n < 0,8 M_u$, maka perlu perkuatan pada struktur atas

Analisis Momen Lapangan Kondisi Beban Ultimate

Pembebanan

a. Beban Mati

Luas beton voided slab adalah

$$\begin{aligned}
 A_b &= \{0,97 \times 0,71 - 2 (1/4 \pi 0,34^2)\} \\
 &= 0,507 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Dengan faktor beban berdasarkan BMS'1992

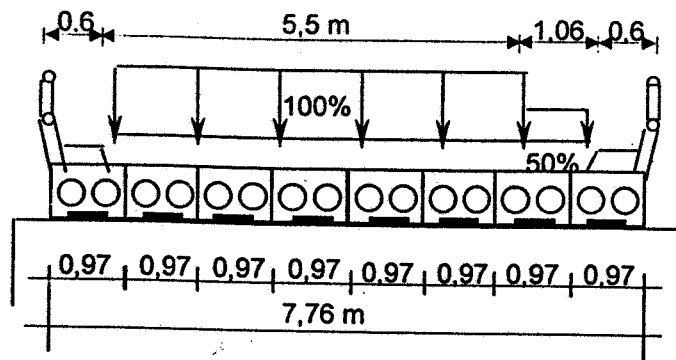
- Berat voided slab (q_b) = $1,3 \times 2,5 \times 0,507 = 1,648 \text{ ton/m}$
- Berat aspal (q_{asp}) = $2 \times 2,2 \times 0,05 \times 0,970 = 0,213 \text{ ton/m}$
- Berat air (q_{air}) = $2 \times 1 \times 0,05 \times 0,970 = 0,097 \text{ ton/m}$

Pembebanan (ULS)

$$q_{DL} = 1,958 \text{ ton/m}$$

b. Beban Hidup

Beban lajur " D " terdiri dari beban tersebar merata (UDL) *uniformly distributed load* yang digabung dengan beban garis (KEL) *knife-edge load*. Panjang memanjang voided slab 16 maka beban terbagi merata (UDL) mempunyai intensitas $q = 8 \text{ T/m}^2$.



Gambar D.2 Beban melintang pada potongan jembatan

Lebar voided slab adalah 0,97 m

$$Q_{LL} = Q_{UDL} \cdot b \cdot 2 = 8 \cdot 0,97 \cdot 2 = 1,552 \text{ Ton/m}$$

c. **Beban Garis " P "**

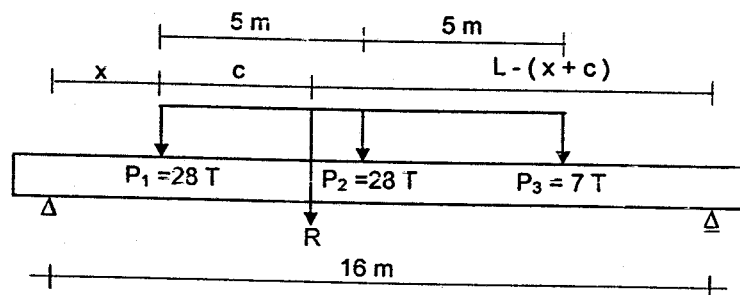
Beban Garis P atau beban hidup terpusat = 4,4 Ton/m

Faktor beban dinamis DLA 0,4 . KEL Lebar voided slab adalah 0,97 m

$$\begin{aligned} P_{LL} &= (1 + DLA) P \cdot b \cdot 2 \\ &= (1 + 0,4) 4,4 \cdot 0,97 \cdot 2 \\ &= 11,95 \text{ Ton} \end{aligned}$$

d. **Beban Bergerak " Truk "**

Menghitung c dari rangkaian 3 muatan :



Faktor beban untuk P_1 , P_2 , dan P_3 (Faktor beban dinamis = 0,4)

$$P_1 = 10 \times 1,4 \times 2 = 28 \text{ Ton}$$

$$P_2 = 10 \times 1,4 \times 2 = 28 \text{ Ton}$$

$$P_3 = 2,5 \times 1,4 \times 2 = 7 \text{ Ton}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= P_1 \cdot 0 + P_2 \cdot 5 + P_3 \cdot 10 \\ &= 0 + 140 + 70 = 210 \text{ Tm} \end{aligned}$$

$$M_1 = R \cdot c = 63c$$

$$63c = 210 \rightarrow c = 3,33 \text{ m}$$

$$V_{\text{Truk L}} = R \left\{ \frac{L - (x + c)}{L} \right\}$$

$$M_{\text{max}} = V_A \cdot x = R \left\{ \frac{L - (x + c)}{L} \right\} x$$

Agar supaya M_{max} mencapai maksimum maka

$$\frac{dM_{\text{max}}}{dx} = 0 \rightarrow L - 2x - c = 0 \rightarrow x = \frac{1}{2}L - \frac{1}{2}c$$

$$x = \frac{1}{2} \times 16 - \frac{1}{2} \times 3,33 \\ = 6,34 \text{ m}$$

Analisis Momen Lapangan

a. Akibat Beban Mati

$$M_{\text{DL}} = \frac{1}{8} \cdot q_{\text{DL}} \cdot L^2 \\ = \frac{1}{8} \cdot 1,958 \cdot 16^2 \\ = 62,556 \text{ Ton m}$$

b. Akibat Beban Hidup 100% Bina Marga

- Beban Hidup UDL dan Kel

$$M_{\text{LL}} = \frac{1}{8} \cdot q_{\text{LL}} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{\text{LL}} \cdot L \\ = \frac{1}{8} \cdot 1,552 \cdot 16^2 + \frac{1}{4} \cdot 11,95 \cdot 16 \\ = 97,464 \text{ Ton m}$$

- Beban "Truk"

$$V_{\text{Truk L}} = 63 \left\{ \frac{16 - (6,34 + 3,33)}{16} \right\} \\ = 24,924 \text{ Ton}$$

$$M_{\text{Truk}} = V_{\text{Truk L}} \cdot x \\ = 24,924 \cdot 6,34 = 158,02 \text{ Ton m}$$

c. Momen Lapang

$$\begin{aligned} M_{u'D'} &= M_{DL} + M_{LL} \\ &= 62,656 + 97,464 \\ &= 160,12 \text{ Ton m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{u'T} &= M_{DL} + M_{Truk} \\ &= 62,656 + 158,02 \\ &= 220,674 \text{ Ton m} \end{aligned}$$

Analisis Momen Lapangan Kondisi Beban Serviceability

Pembebanan

a. Beban Mati

Luas beton voided slab adalah

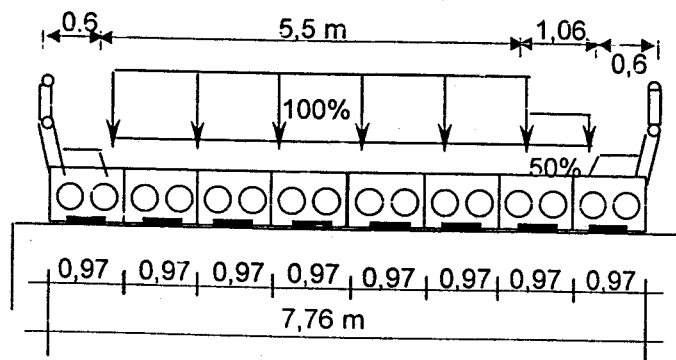
$$\begin{aligned} A_b &= \{0,97 \times 0,71 - 2 (1/4 \pi 0,34^2)\} \\ &= 0,507 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Berat voided slab (q_b) = $2,5 \times 0,507 = 1,268 \text{ Ton/m}$
- Berat aspal (q_{asp}) = $2,2 \times 0,05 \times 0,970 = 0,107 \text{ Ton/m}$
- Berat air (q_{air}) = $1 \times 0,05 \times 0,970 = 0,049 \text{ Ton/m}$

Pembebanan (SLS)	$q_{DL} = 1,424 \text{ Ton/m}$
------------------	--------------------------------

b. Beban Hidup

Beban lajur "D" terdiri dari beban tersebar merata (UDL) *uniformly distributed load* yang digabung dengan beban garis (KEL) *knife-edge load*. Panjang memanjang voided slab 16 maka beban terbagi merata (UDL) mempunyai intensitas $q = 8 \text{ T/m}^2$.



Gambar D.3 Beban melintang pada potongan jembatan

Lebar voided slab adalah 0,97 m

$$q_{LL} = q_{UDL} \cdot b = 8 \cdot 0,97 = 0,776 \text{ Ton/m}$$

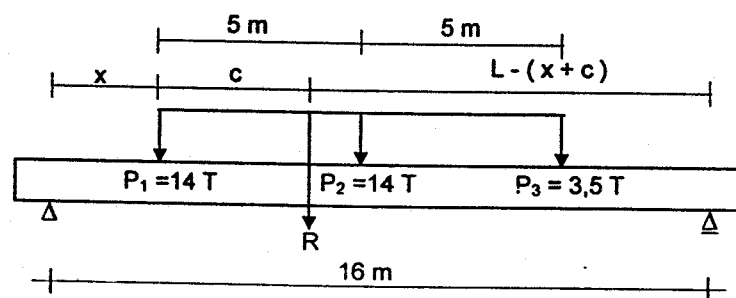
c. Beban Garis " P "

Beban Garis P atau beban hidup terpusat = 4,4 Ton/m
 Faktor beban dinamis DLA 0,4 . KEL Lebar voided slab adalah 0,97 m

$$\begin{aligned} P_{LL} &= (1 + DLA) P \cdot b \\ &= (1 + 0,4) 4,4 \cdot 0,97 \\ &= 5,975 \text{ Ton} \end{aligned}$$

d. Beban Bergerak " Truk "

Menghitung c dari rangkaian 3 muatan :



Faktor beban untuk P_1 , P_2 , dan P_3 (Faktor beban dinamis = 0,4)

$$\begin{aligned} P_1 &= 10 \times 1,4 = 14 \text{ Ton} \\ P_2 &= 10 \times 1,4 = 14 \text{ Ton} \\ P_3 &= 2,5 \times 1,4 = 3,5 \text{ Ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= P_1 \cdot 0 + P_2 \cdot 5 + P_3 \cdot 10 \\ &= 0 + 70 + 35 = 105 \text{ Ton m} \\ M_1 &= R \cdot c = c \\ 31,5 c &= 210 \rightarrow c = 3,33 \text{ m} \end{aligned}$$

$$V_{\text{Truk L}} = R \left\{ \frac{L - (x + c)}{L} \right\}$$

$$M_{\text{max}} = V_A \cdot x = R \left\{ \frac{L - (x + c)}{L} \right\} x$$

Agar supaya M_{max} mencapai maksimum maka

$$\begin{aligned} \frac{dM_{\text{max}}}{dx} = 0 &\rightarrow L - 2x - c = 0 \rightarrow x = \frac{1}{2}L - \frac{1}{2}c \\ x &= \frac{1}{2} \times 16 - \frac{1}{2} \times 3,33 \\ &= 6,34 \text{ m} \end{aligned}$$

Analisis Momen Lapangan**a. Akibat Beban Mati**

$$\begin{aligned}
 M_{DL} &= \frac{1}{8} \cdot q_{DL} \cdot L^2 \\
 &= \frac{1}{8} \cdot 1,424 \cdot 16^2 \\
 &= 45,568 \text{ Ton m}
 \end{aligned}$$

b. Akibat Beban Hidup 100% Bina Marga**- Beban Hidup UDL dan KEL**

$$\begin{aligned}
 M_{LL} &= \frac{1}{8} \cdot q_{LL} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{LL} \cdot L \\
 &= \frac{1}{8} \cdot 0,776 \cdot 16^2 + \frac{1}{4} \cdot 5,975 \cdot 16 \\
 &= 48,732 \text{ Ton m}
 \end{aligned}$$

- Beban "Truk"

$$\begin{aligned}
 V_{TrukL} &= 31,5 \left\{ \frac{16' - (6,34 + 3,33)}{16} \right\} \\
 &= 12,462 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{Truk} &= V_{TrukL} \cdot X \\
 &= 12,462 \cdot 6,34 = 79,01 \text{ Ton m}
 \end{aligned}$$

c. Momen Lapang

$$\begin{aligned}
 M_{u'D'} &= M_{DL} + M_{LL} \\
 &= 45,568 + 48,732 \\
 &= 94,30 \text{ Ton m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{u'T'} &= M_{DL} + M_{Truk} \\
 &= 45,568 + 79,01 \\
 &= 124,578 \text{ Ton m}
 \end{aligned}$$

Kontrol Kekuatan Ultimate Struktur Voided Slab Klas Muatan B.M 70
Resume momen nominal dan momen lapangan

$$M_n = 2,297 \cdot 10^9 \text{ N mm} \rightarrow 0,8 M_n = 1,838 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u'D'} = 160,120 \text{ Ton m} = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u'T'} = 220,674 \text{ Ton m} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u'D'} = 1,6 \cdot 10^9 \text{ N mm} > 0,8 M_n = 1,838 \cdot 10^9 \text{ N mm}$$

$$M_{u'T'} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ N mm} > 0,8 M_n = 1,838 \cdot 10^9 \text{ N mm}$$

Karena $M_{u-T} > M_n > M_{u-D}$, maka perlu perkuatan dengan metode external prestressing

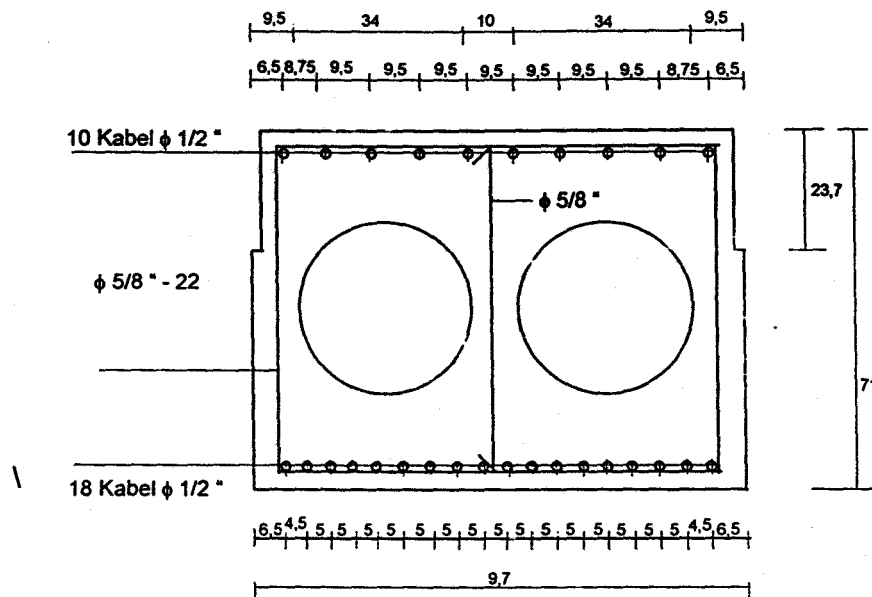
Analisis Momen Lentur Serviceability

Keseimbangan gaya – gaya dalam :

Resultante gaya tekan seluruhnya berasal dari tegangan-tegangan

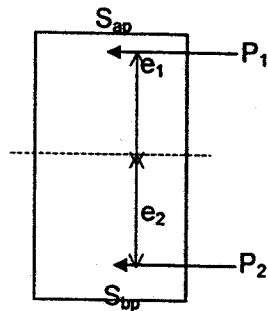
Beton tekan dan tulangan prategang tekan, sedangkan resultante gaya tarik seluruhnya berasal dari tulangan prategang tarik.

Tegangan-Tegangan Sebelum Perkuatan Balok Tengah



No	Profil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)
1	Persegi Panjang	= 97 × 71 = 6687	= 1/12 97 × 71 ³ = 2893113,92
2	Lingkaran	= 2 × 1/4 × π × 34 ² = 6687	= 2 × 1/64 × π × 34 ⁴ = 131194,48
		= 5071,16	= 2761919,44

$$\text{Jadi } W_x = \frac{I_x}{y} = \frac{2761919,44}{35,5} = 77800,55 \text{ cm}^3$$

Analisis tegangan pada penampang**Akibat Gaya Prategang**

Asumsi :

$$e_1 = 31 \text{ cm}$$

$$e_2 = 31 \text{ cm}$$

$$P_1 = 13 \text{ ton} \times 10 \text{ strand} = 130 \text{ ton} = 130000 \text{ kg}$$

$$P_2 = 13 \text{ ton} \times 18 \text{ strand} = 234 \text{ ton} = 234000 \text{ kg}$$

Perjanjian tanda :

Tanda (+) = Bila serat yang ditinjau ada didaerah tarik

Tanda (-) = Bila serat yang ditinjau ada didaerah tekan

$$\begin{aligned} S_{ap} &= -\frac{P_1}{A} - \frac{P_2}{A} + \frac{P_1 \cdot e_1 \cdot y}{I_x} - \frac{P_2 \cdot e_2 \cdot y}{I_x} \\ &= -\frac{130000}{5071,16} - \frac{234000}{5071,16} + \frac{130000 \times 31 \times 35,5}{2761919,44} - \frac{234000 \times 31 \times 35,5}{2761919,44} \\ &= -25,64 - 46,14 + 51,80 - 93,24 \\ &= -30,34 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{bp} &= -\frac{P_1}{A} - \frac{P_2}{A} + \frac{P_1 \cdot e_1 \cdot y}{I_x} - \frac{P_2 \cdot e_2 \cdot y}{I_x} \\ &= -\frac{130000}{5071,16} - \frac{234000}{5071,16} - \frac{130000 \times 31 \times 35,5}{2761919,44} + \frac{234000 \times 31 \times 35,5}{2761919,44} \\ &= -25,64 - 46,14 - 51,80 - 93,24 \\ &= -113,22 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

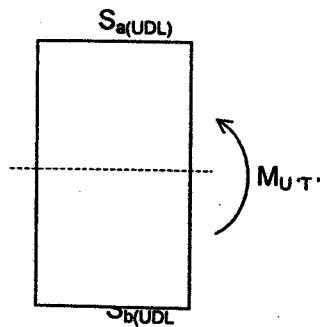
Momen lapangan kondisi serviceability

Resume Pembebanan

$$\begin{aligned} M_{u'D'} &= M_{DL} + M_{LL} \\ &= 45,568 + 48,732 = 94,30 \text{ Ton m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{u'T'} &= M_{DL} + M_{Truk} \\ &= 45,568 + 79,01 = 124,578 \text{ Ton m} \end{aligned}$$

Yang digunakan $M_{u'T'}$, karena paling besar



$$S_{a(u)} = -\frac{M_{U.T}}{W_x}$$

$$= -\frac{12457800}{81496,17}$$

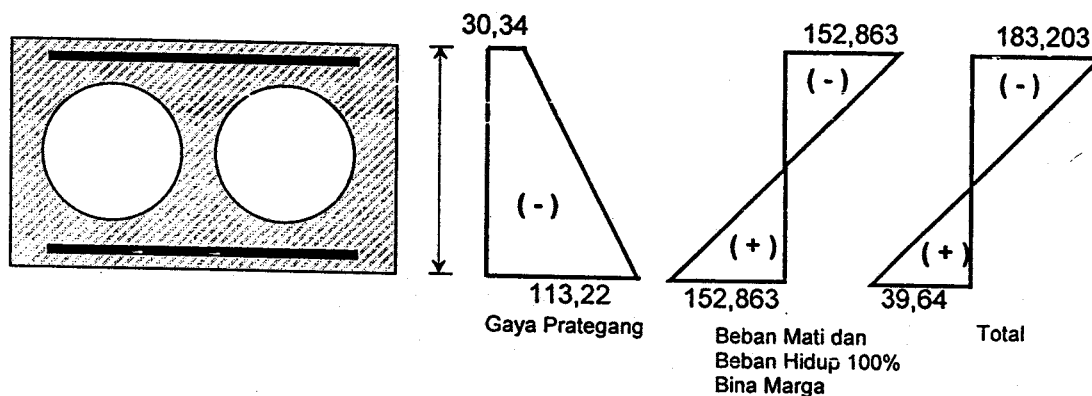
$$= -152,863 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_{a(u)} = \frac{M_{U.T}}{W_x}$$

$$= \frac{12457800}{81496,17}$$

$$= 152,863 \text{ kg/cm}^2$$

Gambar diagram tegangan yang timbul dalam elemen penampang balok tengah voided slab yang disebabkan bekerjanya gaya luar.



Gambar D.4 Diagram tegangan akibat gaya luar balok tepi

Kontrol Kekuatan Serviceability Struktur Voided Slab Klas Muatan B.M 70

Tegangan Ijin Penampang

$$\bar{S}_a = 0,45 f_c' = 0,45 \times 350 = 157,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{S}_b = 0,5 \sqrt{f_c'} = 0,5 \times \sqrt{350} = 9,35 \text{ kg/cm}^2$$

Tegangan Total Akibat Gaya Luar

$$S_{ap} + S_{a(u)} = -30,34 + -152,863 = -183,203 \text{ kg/cm}^2$$

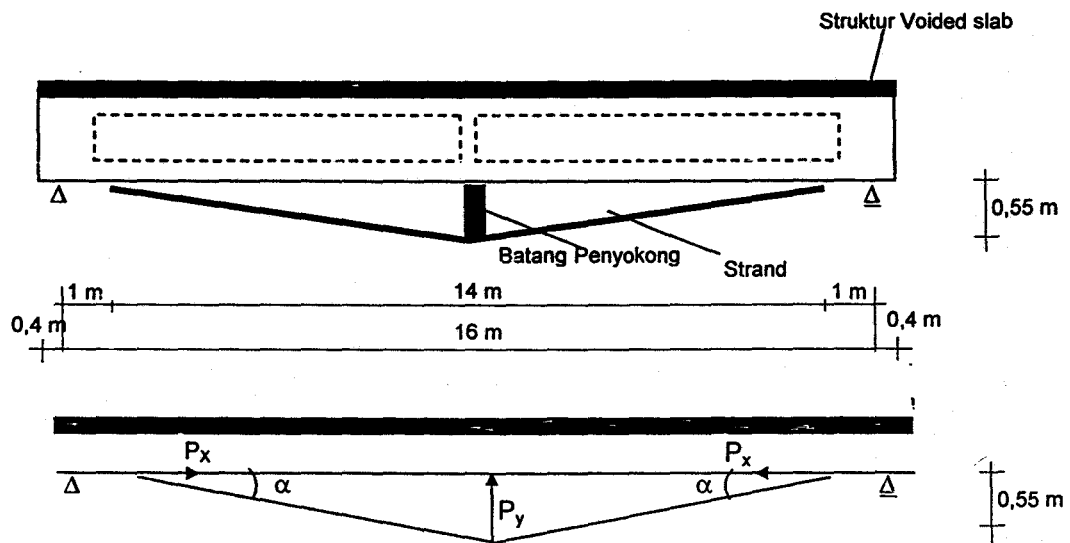
$$S_{bp} + S_{b(u)} = -113,22 + 152,863 = 39,64 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_a = 183,203 \text{ kg/cm}^2 > \bar{S}_a = 157,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_b = 39,64 \text{ kg/cm}^2 > \bar{S}_a = 9,35 \text{ kg/cm}^2$$

Karena tegangan pada tulangan prategang tekan dan tulangan prategang tarik melebihi tegangan ijin maka perlu perkuatan yaitu dengan metode perkuatan external prestressing

Analisis Struktur Dengan Perkuatan



Gambar D.5 Analisis struktur dengan perkuatan

$$\alpha = \text{arc tg } \alpha = \text{arc tg } \frac{0,55}{7} = 4^{\circ}29'33,29''$$

Maka dicoba tipe strand ASTM GRADE 270 13 mm (0,5")

Spesifikasi Strand ASTM GRADE 270 13 mm (0,5")

Diameter nominal = 12,70 mm

Luas penampang = 98,71 mm²

Asumsi :

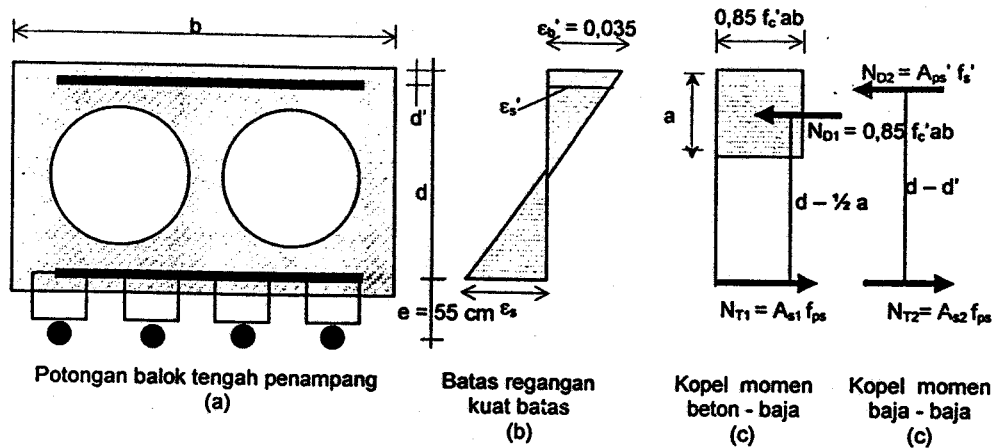
Gaya Prategang efektif yang bekerja = 10000 kg

Digunakan 4 Kabel = 4 × 10000 = 40000 kg

$$P_x = P \cos \alpha = 40000 \times \cos 4^{\circ}29'33,29'' = 39877,099 \text{ kg}$$

$$P_y = P \sin \alpha = 40000 \times \sin 4^{\circ}29'33,29'' = 3133,200 \text{ kg}$$

Perhitungan Kapasitas Momen Dengan Perkuatan (Ultimate)



Gambar D.6 Analisis balok voided slab

Dimana :

$$d = 665 \text{ mm}$$

$$d' = 45 \text{ mm}$$

Asumsi bahwa semua tulangan prategang telah meluluh, maka $f'_s = f_{ps}$ dan $f_s = f_{ps}$ dengan demikian

$$A_{ps2} = A_{ps}'$$

$$A_{ps} = A_{ps1} + A_{ps2}$$

Maka, gaya tarik maksimum yang terjadi pada baja setelah dikurangi akibat adanya baja tekan T_1

$$A_{ps1} = A_{ps} - A_{ps}'$$

$$= 2280,184 - 1266,769$$

$$= 1013,415 \text{ mm}^2$$

$$T_1 = A_{ps1} \cdot f_{ps}$$

$$= 1013,415 \cdot 1720,104$$

$$= 1743179,195 \text{ N}$$

dari pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik, tinggi blok tegangan tekan beton dapat dihitung sebagai berikut :

$$a = \frac{A_{ps1} \cdot f_{ps}}{(0,85 f_c') b} = \frac{1013,415 \cdot 1720,104}{(0,85 \cdot 35) 970} = 60 \text{ mm} \leq 0,423 d = 0,423 (665) = 281 \text{ mm}$$

Dengan menggunakan anggapan sama dengan yang dipakai pada balok bertulangan prategang tarik saja tentang hubungan antara tinggi blok tegangan tekan dengan jarak garis netral penampang balok terhadap serat tepi tekan ($a = \beta_1 c$), maka letak garis netral dapat ditentukan dan selanjutnya digunakan untuk memeriksa regangan-regangan tulangan prategang baja.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{60}{0,81} = 75 \text{ mm}$$

Pemeriksaan regangan-regangan tulangan baja prategang dengan berdasarkan segi tiga sebangun, untuk mengetahui apakah asumsi yang digunakan benar, yang berarti bahwa kedua penulangan baik tulangan prategang tekan ataupun tulangan partegang tarik telah luluh sebelum beton hancur

Regangan yang diperhitungkan terjadi pada saat dicapai momen ultimit :

$$\varepsilon_{ps}' = \frac{f_{ps}}{E_{ps}} - \frac{c-d'}{c} (0,003) = \frac{1720,104}{1,96 \cdot 10^5} - \frac{(75-45)}{75} (0,003) = 0,0075$$

$$\varepsilon_{ps} = \frac{f_{ps}}{E_{ps}} + \frac{d-c'}{c} (0,003) = \frac{(665-75)}{75} (0,003) = 0,035$$

$$\varepsilon_{py} = 0,035$$

Karena $\varepsilon_{ps} < \varepsilon_{py} < \varepsilon_{ps}'$, maka tulangan baja prategang tarik telah meluluh tetapi baja prategang tekan belum. Dengan demikian, ternyata anggapan-anggapan pada langkah awal tidak benar. Maka nilai f_{ps} untuk M_{n1} adalah $f_{psa} = \varepsilon_{ps} \cdot E_{ps} = 0,0075 \times 1,96 \cdot 10^5 = 1470$

Perhitungan momen nominal

(Asumsi karena perubahan dp kecil maka dp tetap)

Dari pasangan kopel beton tekan dengan tulangan baja prategang tarik

$$M_{n1} = A_{ps1} \cdot f_{psa} \left(d_p - \frac{1}{2} a \right)$$

$$= 1013,415 \times 1470 \left(665 - \frac{1}{2} (60) \right)$$

$$= 9,46 \cdot 10^8 \text{ N mm}$$

$$M_{n2} = A_{ps}' \cdot f_{ps} (d_p - d_p')$$

$$= (1266,769 + (4 \times 0,25 \times 3,14 \times 12,7^2)) \cdot 1720,10 (665 - 45)$$

$$= 1,891 \cdot 10^9 \text{ N mm}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

$$= 9,46 \cdot 10^8 + 1,891 \cdot 10^9$$

$$= 2,837 \cdot 10^9 \text{ N mm}$$

Kontrol Kekuatan Ultimate Struktur Voided Slab Klas Muatan B.M 70

Resume momen nominal dan momen lapangan

$$M_n = 2,837 \cdot 10^9 \text{ N mm} \rightarrow 0,8 M_n = 2,27 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u \cdot D} = 160,120 \text{ Ton m} = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u \cdot T} = 220,674 \text{ Ton m} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u \cdot D} = 1,6 \cdot 10^9 \text{ N mm} > 0,8 M_n = 2,27 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

$$M_{u \cdot T} = 2,2 \cdot 10^9 \text{ N mm} > 0,8 M_n = 2,27 \cdot 10^9 \text{ Nmm}$$

Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan Momen nominal lebih kecil dari momen ultimate, maka perkuatan telah memenuhi syarat B.M 100%

Tegangan Tarik External Prestressing (Serviceability)

Beban prategang efektif mengakibatkan tegangan pada beton tarik

No	Profil	A (cm ²)	I _x (cm ⁴)
1	Persegi Panjang	= 97 × 71 = 6687	= 1/12 97 × 71 ³ = 2893113,92
2	Lingkaran	= 2 × 1/4 × π × 34 ² = 6687	= 2 × 1/64 × π × 34 ⁴ = 131194,48
		= 5071,16	= 2761919,44

$$\text{Jadi } W_x = \frac{I_x}{y} = \frac{2761919,44}{35,5} = 77800,55 \text{ cm}^3$$

Momen akibat gaya tekan batang penyokong

$$M_p \frac{1}{4} P_y L = \frac{1}{4} \times 3133,200 \times 1600 = 1253280 \text{ kg cm}$$

$$f_{ae} = -\frac{P_x}{A_b} + \frac{P_x \cdot e \cdot y}{I_x} + \frac{M_p \cdot y}{I_x}$$

$$= -\frac{39877,099}{5071,16} + \frac{39877,099 \times 35,5}{2761919,44} + \frac{1253280 \times 35,5}{2761919,44}$$

$$= -7,686 + 17,785 + 16,109$$

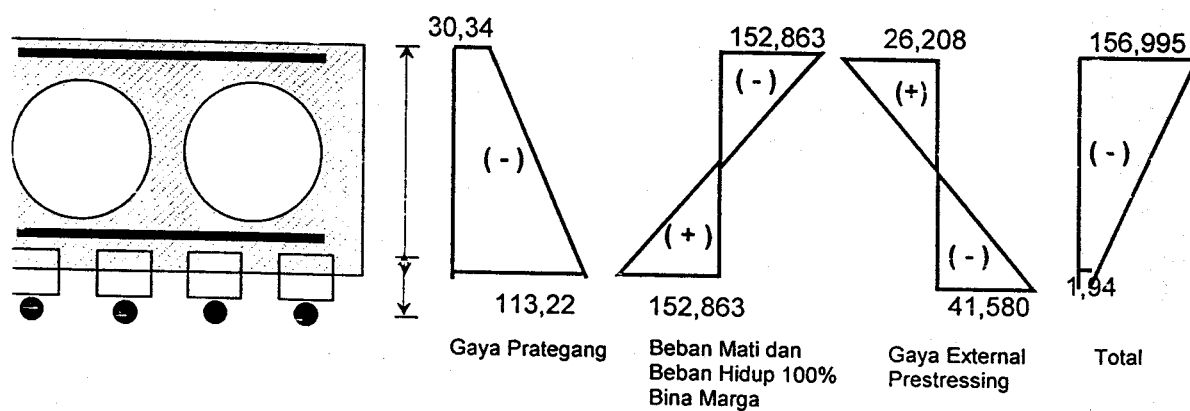
$$= +26,208 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{ae} = -\frac{P_x}{A_b} - \frac{P_x \cdot e \cdot y}{I_x} - \frac{M_p \cdot y}{I_x}$$

$$= -\frac{39877,099}{5071,16} - \frac{39877,099 \times 35,5}{2761919,44} - \frac{1253280 \times 35,5}{2761919,44}$$

$$= -7,686 - 17,785 - 16,109$$

$$= -41,580 \text{ kg/cm}^2$$



Gambar D.7 Diagram tegangan total setelah adanya gaya external prestressing

Kontrol Tegangan**Tegangan Ijin Penampang**

$$\bar{S}_a = 0,45 f_c' = 0,45 \times 350 = 157,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{S}_b = 0,5 \sqrt{f_c'} = 0,5 \times \sqrt{350} = 9,35 \text{ kg/cm}^2$$

Tegangan Total Akibat Gaya Luar + Perkuatan

$$S_{ap} + S_{a(u)} + f_{ae} = -30,34 + -152,863 + 26,208 = -156,995 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_{bp} + S_{b(u)} + f_{be} = -113,22 + 152,863 - 41,580 = 1,94 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_a = 156,995 \text{ kg/cm}^2 < \bar{S}_a = -157,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_b = 1,94 \text{ kg/cm}^2 < \bar{S}_a = -9,35 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan tegangan pada tulangan prategang tarik lebih kecil dari tegangan ijin, maka perkuatan telah memenuhi syarat B.M 100%

Untuk perencanaan detail angker dan deviator dianalisis berdasarkan gaya-gaya yang terjadi pada angker dan deviator.

**Lampiran E
(informatif)****Daftar nama dan lembaga****1) Pemrakarsa**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Kimpraswil

2) Penyusun

Nama	Lembaga
Panji Krisna Wardana, ST., MT.	Pusat Litbang Prasarana Transportasi
Deni Zaini, ST	Pusat Litbang Prasarana Transportasi