

4 9 1 5 0 0 4 8 0 2 J B 0 4 0 6

LAPORAN AKHIR

PENGEMBANGAN GELAGAR MENERUS
SISTEM SEGMENTAL
DENGAN BETON MUTU TINGGI

DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN

Jl. A.H. Nasution No. 264 Kotak Pos 2 Ujungberung Telp. (022) 7802251 Fax. 7802726 Bandung 40294 e-mail:pusjatan@pusjatan.pu.go.id



0000016986

PENGEMBANGAN GELAGAR MENERUS
SISTEM SEGMENTAL DENGAN BETON MUTU TINGGI

TAHUN 2006

Bandung, Desember 2006

Penanggung Jawab Studi,

4 9 1 5 0 0 4 8 0 2 J B 0 4 0 6

LAPORAN AKHIR

PENGEMBANGAN GELAGAR MENERUS
SISTEM SEGMENTAL
DENGAN BETON MUTU TINGGI

Barcode 0016986

	PERPUSTAKAAN PUSLITBANG PRAS. TRANSPORTASI
No. IND.	: 2007/10289
MFN	:
UDC	: 624.27(047.31)
EX	: ke-1

DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM
BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Jl. A.H. Nasution No. 264 PO BOX 2 Bandung 40294 Indonesia
Telp. (022) 7802251 Fax. 7802726 e-mail: pusjatan@pusjatan.pu.go.id

Dr. Ir. M. Shadnanulrwan, MSc

**PENGEMBANGAN GELAGAR MENERUS
SISTEM SEGMENTAL DENGAN BETON MUTU TINGGI**

TAHUN 2006

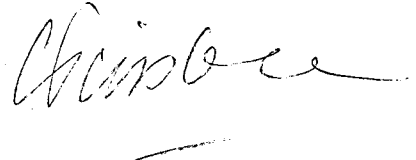
Bandung, Desember 2006

Mengetahui,
Kepala Balai/Koordinator Penelitian

Penanggung Jawab Studi,



Dr. Ir. Siegfried, M Sc.
NIP 110 052 487



Prof. Ir. Lanneke Tristanto
NIP 110 013 248

Menyetujui,
Ketua Tim Teknis



Ir. Agus Bari Sailendra, M Sc
NIP 110 020 993



Dr. Ir. M. Mahdanulirwan, MSc
NIP 110 019 271

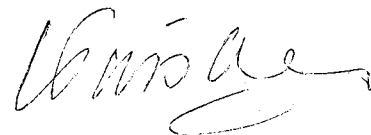
4 9 1 5 0 0 4 8 0 2 J B 0 4 0 6

**PENGEMBANGAN GELAGAR MENERUS
SISTEM SEGMENTAL DENGAN BETON MUTU TINGGI**

Tim Pelaksana :

- 1. Penanggung Jawab Studi : Prof.Ir. Lanneke Tristanto**
- 2. Anggota Tim : 1. N. Retno Setiati, ST, MT**
2. Iif Harry Setyadi, ST
3. Asep Yanto, ST
4. Surya Putra B.Sc
5. Tasrifin

Penanggung Jawab Studi,



Prof.Ir. Lanneke Tristanto
NIP 110 013 248

Ringkasan Eksekutif

1. LATAR BELAKANG

Gelagar menerus sistem segmental dengan beton mutu tinggi dikaji untuk meningkatkan efisiensi bangunan atas dan bangunan bawah jembatan dalam segi dimensi, berat sendiri beton, pengurangan sambungan lantai dan perletakan, dan penghematan biaya transportasi komponen pracetak. Biaya transportasi menjadi setengahnya gelagar monolitik bila menggunakan sistem segmental dengan panjang komponen 5-7m.

Gelagar I komposit sistem segmental dengan beton mutu tinggi $f_c' 65$ MPa dalam bentang tunggal yang bervariasi antara 22 – 40 m dikembangkan untuk menjadi gelagar menerus, dengan penyatuan lantai dan diafragma di kepala pilar.

2. TUJUAN DAN SASARAN

2.1 Tujuan

Tujuan pengkajian ini adalah :

- Mengembangkan teknologi jembatan bentang panjang sistem segmental
- Meningkatkan industri beton mutu tinggi pracetak

2.2 Sasaran

Sasaran pengkajian ini adalah :

- Standarisasi gelagar beton mutu tinggi sistem segmental
- Efisiensi dalam desain dan pelaksanaan jembatan bentang panjang

3. HIPOTESA

Gelagar yang tersambung secara segmental harus memenuhi persyaratan kapasitas seperti gelagar utuh, dengan menjaga integritas sambungan segmental.

Sambungan antara segmen mulai terbuka pada batas tegangan tarik ijin $0,33 (f_c')^{0,5}$ MPa . Sambungan dalam perencanaan prategang parsial harus berada dalam batas tegangan tarik ijin tersebut. Keutuhan sambungan dalam keadaan daya layan dapat dicapai dengan perencanaan prategang penuh dimana tegangan tarik sama dengan nol. Hanya pada keadaan ultimit masih terdapat kemungkinan bahwa sambungan terbuka/tidak utuh.

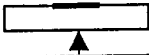
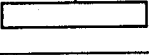
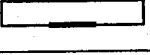
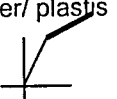
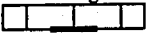
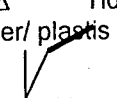
4. METODOLOGI

Hasil eksperimen prototipe dan pengamatan yang diperoleh menjadi data aktual yang diverifikasi terhadap persyaratan teoritis dari keutuhan sambungan antara segmen-segmen gelagar.

5. HASIL PENELITIAN

Kesamaan hasil pengujian beban pada gelagar monolitik vs segmental - Tabel E1, menunjukkan bahwa gelagar dengan sambungan epoksi maupun gelagar monolitik mengalami retak awal pada beban yang sama. Kapasitas daya pikul beban tidak terpengaruh oleh letak sambungan. Walaupun demikian, letak sambungan harus direncanakan di bagian momen dan geser tidak kritis, agar menghindari perpindahan titik kritis ke sambungan berdekatan dan mencegah pemusatan regangan/tegangan setempat akibat mulai terbukanya sambungan pada saat penegangan tendon dan pada beban rencana. Sambungan epoksi setelah terbuka akan bersifat sebagai sambungan kering/tanpa epoksi yang hanya terikat oleh gerigi beton dan tendon prategang. Dengan kata lain, faktor reduksi kekuatan ultimit dari 0,95 (sambungan epoksi) menurun menjadi 0,90 (sambungan kering).

Tabel E1. Kesamaan antara hasil uji gelagar monolitik dan segmental

Tipe gelagar	Penegangan tendon -100% SLS	Beban daya layan 100% SLS	Beban retak 150% SLS	Beban ultimit $\leq 175\%$ SLS	Beban runtuh 175-200% SLS
Monolitik	Utuh, tegangan tarik tepi atas gelagar 	Gelagar utuh 	Retak awal tepi bawah gelagar 	Beban vs lendutan P-Δ Linier/elastis 	P-Δ Tidak linier/ plastis 
Segmental	Utuh, tegangan tarik tepi atas sambungan 	Gelagar utuh 	Retak awal tepi bawah sambungan 	Beban vs lendutan P-Δ Linier/elastis 	P-Δ Tidak linier/ plastis 

6. KESIMPULAN DAN SARAN

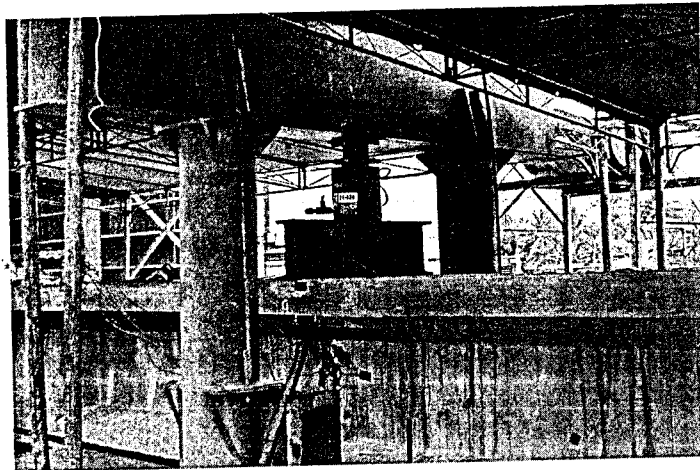
6.1 Kesimpulan

1. Efisiensi peningkatan mutu beton dari f_c' 40 MPa (mutu standar beton prategang) ke 65 MPa, adalah 17% untuk perpanjangan bentang dan 24% untuk penghematan berat sendiri
2. Beton mutu tinggi untuk komponen jembatan adalah optimal 65-75MPa dengan mana tercapai keseimbangan antara desain (semua mungkin dihitung) dan pelaksanaan (tidak semua mungkin dikerjakan)
3. Gelagar segmental I komposit untuk bentang tunggal 22m, 31m, 35m, 40m dan kelipatan bentang menerus, menggunakan desain/dimensi gelagar yang sama, sehingga membentuk satu pedoman teknis yang mencakup modifikasi diafragma pilar.

6.2 Saran

1. Jumlah segmen dalam bentang (L) gelagar segmental bentuk I dengan rantai komposit dalam produksi gelagar segmental pracetak selanjutnya dibuat ganjil agar letak sambungan tidak berdekatan dengan titik kritis momen ($1/2 L$) dan geser ($1/4 L$)
2. Desain dibuat prategang penuh (tegangan tarik nol) sehingga terdapat keutuhan sambungan segmen dalam keadaan batas layan. Hanya pada keadaan batas ultimit terdapat kemungkinan bahwa sambungan segmen terbuka, yang diatasi dengan saran butir 1.
3. Tendon yang ditarik secara eksentris dibatasi dengan meletakkan maksimum dua tendon dalam satu baris horisontal, dengan demikian lendutan gelagar ke arah samping di-minimal-kan dalam proses penegangan tendon.

7. FOTO KEGIATAN



Gambar E1. Pengujian prototipe gelagar segmental di pabrik pracetak Buntu

KATA PENGANTAR

Penelitian "Pengembangan Gelagar Menerus Sistem Segmental Dengan Beton Mutu Tinggi" mengkaji hasil uji-coba gelagar dengan pembagian segmen dalam jumlah genap (4-6). Produksi komponen beton pracetak selama ini menggunakan pembagian segmen secara genap, dimana titik kritis di tengah bentang berdekatan dengan lokasi sambungan.

Tegangan tarik berlebih di tengah bentang selalu terjadi, yaitu pada saat pembuatan (penegangan tendon) dan saat pembebanan dalam batas layan dan ultimit. Prategang parsial yang mengijinkan terjadinya tegangan tarik lebih sesuai untuk gelagar monolitik, sedangkan pada gelagar segmental akan lebih aman bila digunakan prategang penuh.

Hipotesa penelitian yang perlu dibuktikan, adalah asumsi bahwa gelagar segmental harus sama kuat dengan gelagar utuh. Untuk menjaga keutuhan, tegangan ijin tarik di sambungan tidak boleh terlampaui atau sama dengan nol.

Lingkup kegiatan yang akan dilakukan untuk mencapai sasaran yang telah direncanakan adalah

- Mengumpulkan bahan referensi yang berhubungan dengan beton mutu tinggi dan gelagar beton pracetak segmental
- Mengkaji perbandingan kekuatan dan keutuhan sambungan gelagar pada percobaan pembebanan gelagar prototipe monolitik terhadap segmental
- Mempersiapkan konsep pedoman gelagar I komposit segmental dengan beton mutu tinggi untuk bentang tunggal dan bentang menerus termasuk modifikasi diafragma pilar

Penelitian ini terfokus pada prototipe gelagar utuh (2002) dan segmental (2005-2006), yang telah dibuat dan diuji di proyek pengadaan komponen beton pracetak untuk jembatan (Buntu). Atas kerjasama dan dukungan semua pihak yang telah berkarya dalam men-sukses-kan penelitian ini, dengan ini kami mengucapkan banyak terima kasih.

Abstrak

Gelagar menerus sistem segmental dengan beton mutu tinggi dikaji untuk meningkatkan efisiensi bangunan atas dan bangunan bawah jembatan dalam segi dimensi, berat sendiri beton, pengurangan sambungan lantai dan perletakan, dan penghematan biaya transportasi komponen pracetak. Biaya transportasi menjadi setengahnya gelagar monolitik bila menggunakan sistem segmental dengan panjang komponen 5-7m.

Gelagar I komposit sistem segmental dengan beton mutu tinggi $f_c' 65$ MPa dalam bentang tunggal yang bervariasi antara 22 – 40 m dikembangkan untuk menjadi gelagar menerus, dengan penyatuan lantai dan diafragma di kepala pilar. Peningkatan kapasitas daya pikul adalah 20 % bila beberapa bentang sederhana digabung menjadi gelagar menerus, dan cara ini sering digunakan untuk perkuatan gelagar sederhana pada jembatan lama. Peningkatan tersebut dimanfaatkan dengan mempertahankan dimensi gelagar bentang tunggal untuk susunan bentang menerus.

Hasil uji-coba menunjukkan bahwa tegangan tarik melampaui batas ijin pada sambungan segmental yang berdekatan dengan titik kritis di tengah bentang, dan menyebabkan terbukanya sambungan.

Gelagar dengan jumlah segmen yang ganjil (3-5) akan menghindari sambungan di tengah bentang. Keutuhan gelagar akan dicapai dengan merencanakan letak sambungan diluar titik kritis untuk momen dan geser. Dengan prategang penuh, semua potongan kritis maupun tidak kritis tetap utuh dalam keadaan batas layan. Desain prategang penuh memerlukan agak lebih banyak tendon. Dalam keadaan ultimit masih terdapat kemungkinan bahwa sambungan segmen terbuka. Hal ini teratasi dengan jumlah segmen yang ganjil.

Produksi gelagar segmental dengan jumlah segmen genap sesuai gambar standar (1979), sekarang (2006) mulai diperbaiki dengan penggunaan jumlah segmen ganjil. Hasil penelitian ini berkelanjutan dalam mendukung industri beton pracetak mutu tinggi dan produksi gelagar segmental yang setaraf gelagar "utuh".

DAFTAR ISI

	Halaman
Lembar Pengesahan	i
Tim Pelaksana Kegiatan	ii
Ringkasan Eksekutif	iii
Kata Pengantar	iv
Abstrak	v
Daftar Isi	vi
 BAB I	
PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan dan Sasaran	1
1.3 Luaran (Output)	1
1.4 Hasil (Outcome)	1
1.5 Manfaat (Benefit)	2
1.6 Dampak (Impact)	2
 BAB II	
KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Umum	3
2.1 Gelagar segmental dalam bentangan menerus	3
2.3 Dua-lima bentang menerus	4
2.4 Kapasitas gelagar monolitik terhadap segmental	5
2.5 Gelagar boks segmental alternatif	6
 BAB III	
HIPOTESA	7
 BAB IV	
METODOLOGI	
4.1 Kerangka Pemikiran	8
4.2 Lokasi	9
4.3 Teknik Pengambilan Data	9
4.4 Teknik Analisis	11
 BAB V	
HASIL PENELITIAN/PENGEMBANGAN /PENGAJIAN	
5.1 Hasil Uji Gelagar Segmental	13
5.2 Kapasitas Gelagar Monolitik terhadap Gelagar Segmental	17
 BAB VI	
KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Kesimpulan	23
6.2 Saran	23
 DAFTAR PUSTAKA	24
 LAMPIRAN A : GELAGAR I KOMPOSIT BENTANG TUNGGAL	25
LAMPIRAN B : GELAGAR I KOMPOSIT DIBUAT BENTANG MENERUS	31
LAMPIRAN C : STANDAR GELAGAR SEGMENTAL DENGAN BETON MUTU TINGGI (PERENCANAAN PRATEGANG PENUH)	31

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam tahun 2002 telah dilaksanakan prototipe gelagar I monolitik dengan lantai komposit untuk bentang tunggal 22m. Prategangan internal digunakan dalam kombinasi pra dan pasca penegangan untuk gelagar tipe monolitik. Kemudian dilanjutkan dengan prototipe gelagar I segmental dengan lantai komposit untuk bentang tunggal 22m dalam tahun 2005-2006 dengan prategangan internal berupa pasca penegangan. Mutu beton dibuat relatif sama untuk gelagar monolitik dan segmental dengan f_c' 65 MPa. Dari kedua penelitian tersebut diperoleh perbandingan kapasitas gelagar monolitik terhadap gelagar segmental.

Keuntungan dan penghematan yang diperoleh harus ditinjau dari keseluruhan struktur jembatan bentang menerus. Pengurangan jumlah sambungan dilatasi adalah salah satu keuntungan. Penghematan dimensi gelagar bangunan atas mempengaruhi pengurangan dimensi pilar, serta pengurangan beban pada bangunan bawah dan pondasi jembatan.

Pencapaian keutuhan sambungan segmen ke segmen perlu dikaji. Persyaratan perencanaan untuk prategangan parsial dan prategangan penuh harus memenuhi kriteria agar sambungan tetap utuh selama masa pelayanan dan tidak mudah terbuka akibat tegangan tarik pada pembebanan ultimit.

Sistem gelagar menerus mengalami tegangan sekunder akibat penurunan diferensial dari pondasi. Batasan penurunan yang masih diijinkan perlu dikaji agar kapasitas pondasi dapat disesuaikan.

1.2 Tujuan dan Sasaran

Tujuan dan sasaran pengkajian ini adalah :

- Mengembangkan teknologi jembatan bentang panjang sistem segmental
- Meningkatkan industri beton pracetak
- Standarisasi gelagar beton mutu tinggi sistem segmental
- Efisiensi dalam desain dan pelaksanaan jembatan bentang panjang

1.3 Luaran (Output)

Luaran pengkajian adalah sebagai berikut :

- Kriteria perencanaan sambungan segmental untuk gelagar beton pracetak
- Kriteria penempatan tendon dan jangkar prategang dalam keterbatasan dimensi gelagar beton mutu tinggi
- Batas optimal peningkatan mutu beton untuk komponen gelagar beton pracetak

1.4 Hasil (Outcome)

Hasil pengkajian adalah dalam acuan pedoman sebagai berikut :

- Acuan pedoman teknis gelagar segmental I komposit beton mutu tinggi untuk bentang tunggal 22-40m dan kelipatan bentang menerus dengan modifikasi diafragma pilar
- Acuan cara penahan gelagar terhadap gaya lateral gempa (*retrofit*) sesuai standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan (RSNI 2006, revisi SNI 03-2833-1992)
- Acuan cara penutupan retakan pada lantai menerus diatas pilar (*sealing*) dengan bahan sealant fleksibel (aspal mastik).

1.5 Manfaat (Benefit)

Manfaat utama adalah peningkatan kapasitas dan kualitas gelagar beton pracetak segmental dalam pembangunan jembatan bentang panjang.

1.6 Dampak (Impact)

Perbaikan pola segmental yang diperlukan untuk mencapai keutuhan gelagar segmental dalam produksi komponen beton pracetak selanjutnya.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Umum

Kajian pustaka luar negeri menjadi dasar untuk kriteria sistem segmental yang akan diterapkan di Indonesia. Pengkajian di bidang jembatan segmental telah intensif dikembangkan di luar negeri dalam skala pengujian penuh, sehingga harus diverifikasi dengan hasil pengkajian dalam negeri untuk memperoleh persamaan dalam asumsi.

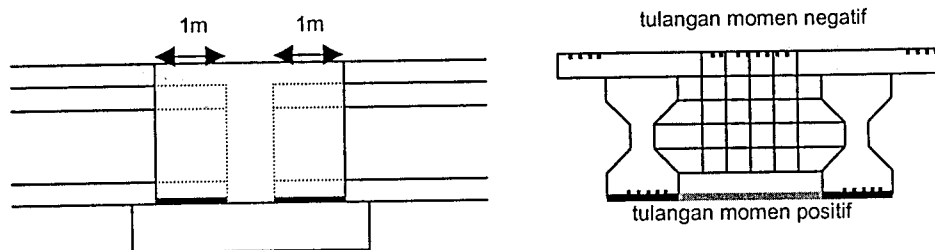
2.2 Gelagar segmental dalam bentangan menerus

Dasar pemikiran dari pembahasan ini adalah membuat gelagar segmental sederhana menjadi menerus dalam memikul beban hidup dan beban mati tambahan. Gelagar direncanakan sebagai bentang sederhana untuk memikul beban mati, dan penulangan lantai memberikan kapasitas momen negatif diatas pilar. Momen negatif akibat beban hidup dan beban mati tambahan dapat dipikul dengan dua cara : penulangan arah memanjang dalam lantai dan/atau penulangan diafragma.

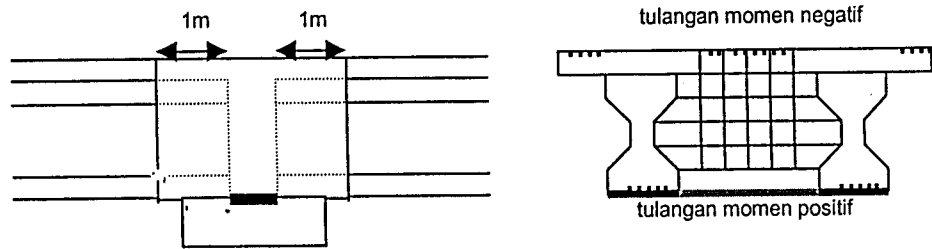
Diafragma dengan penulangan sesuai bentangan gelagar dikembangkan untuk menjadi detail standar. Dalam men-desain momen negatif diatas pilar, diperhitungkan pengaruh momen positif akibat kehilangan prategang gelagar dalam jangka panjang karena rangkai susut dan perpendekan elastis. Momen positif tersebut dapat ditahan oleh 'dowel' atau 'strand' (cara jalan tol Jagorawi yang ternyata berhasil baik) yang diperpanjang dari ujung gelagar ke dalam diafragma. Diafragma merupakan balok persegi setinggi gelagar termasuk lantai, dengan lebar sama dengan flens tepi bawah gelagar – Gambar 2.1 & 2.2.

Penulangan diafragma/lantai komposit di-desain untuk mengendalikan retak sebagai berikut :

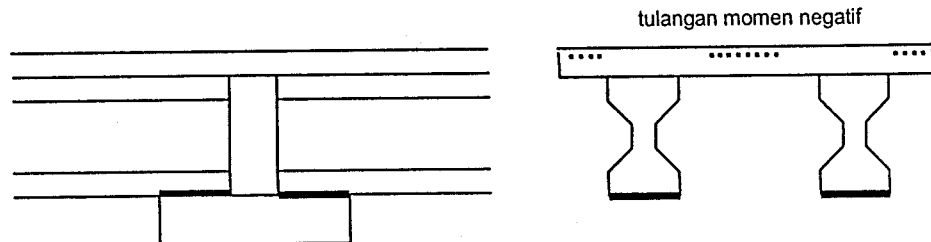
- Rangkai dan susut dari gelagar menyebabkan momen positif 'permanen' dan retakan di tepi bawah diafragma, penulangan dalam flens bawah gelagar
- Beban hidup dan beban mati tambahan menyebabkan momen negatif 'sementara' dan retakan di tepi atas diafragma, penulangan dalam lantai
- Momen positif tidak selalu terjadi bersamaan dengan momen negatif
- Retakan momen positif diketemukan dalam hasil riset luar negeri
- Momen positif tidak dapat di-eliminir dan diperhitungkan berdasarkan kehilangan prategang jangka panjang atau sebesar $1,2 M_{cr}$ ($= 1,2 f_r \times \text{Momen penahan } W$, dimana batas lentur putus $f_r = 0,75\sqrt{f_c'}$)
- Penulangan horisontal untuk susut dan termal dan tulangan sengkang minimum



Gambar 2.1 Diafragma dengan gelagar diatas 2 perletakan, dapat diganti dengan 1 perletakan untuk kedua gelagar setelah diafragma selesai dicor



Gambar 2.2 Diafragma dengan gelagar diatas satu perletakan, jalan tol Jagorawi

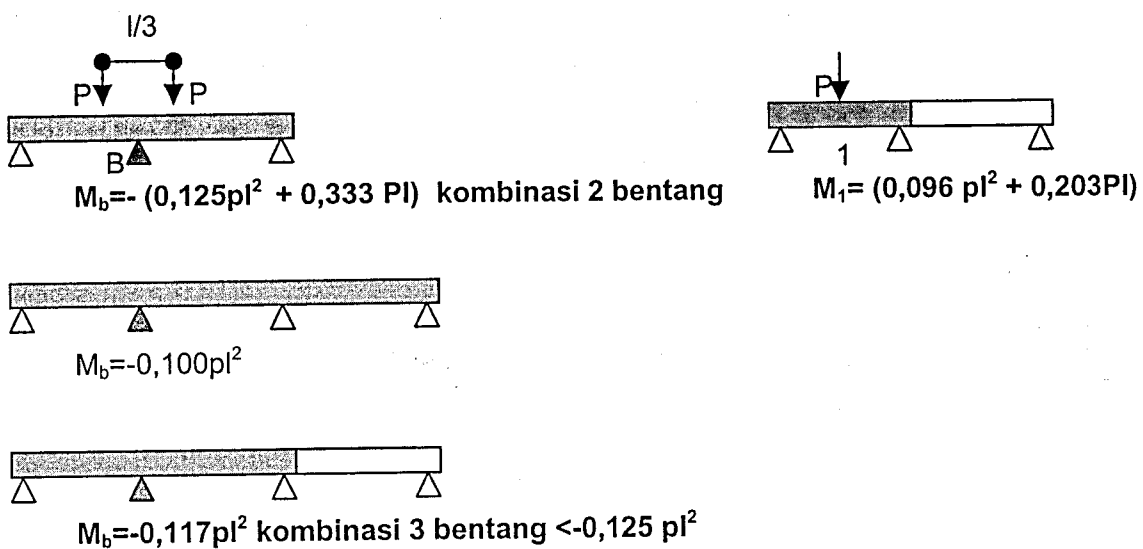


Gambar 2.3 Tanpa diafragma, gelagar diatas dua perletakan, rantai menerus, jalan tol Jakarta-Cikampek

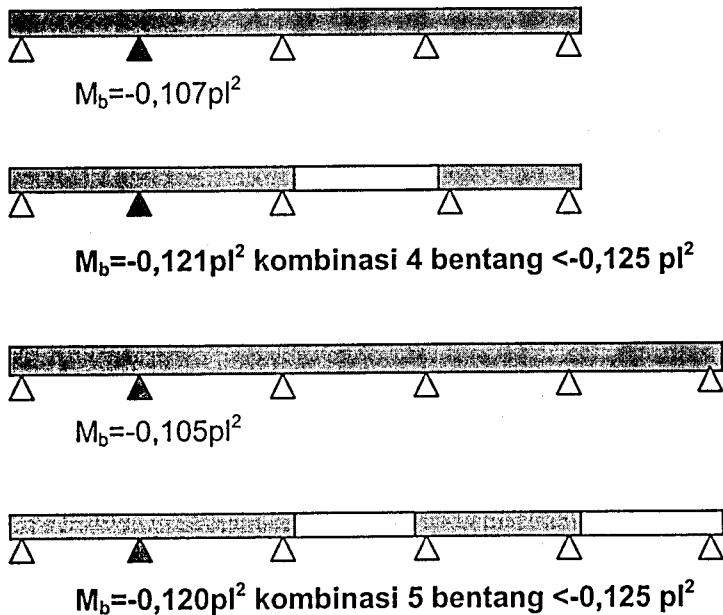
Diafragma tipikal di pilar (Gambar 2.1, 2.2, 2.3) menunjukkan potongan memanjang dan melintang. Tipe diafragma yang berhasil baik terdapat pada jalan tol Jagorawi. Diafragma di kepala jembatan dibuat serupa dengan di pilar sehingga susunan gelagar di kedua ujung dipersatukan oleh diafragma. Dalam pedoman teknis akan digunakan tipe diafragma dengan dua perletakan (Gambar 2.1) yang dapat menjadi satu perletakan (Gambar 2.2).

2.3 Dua-lima bentang menerus

Kombinasi dua bentang menerus mewakili momen negatif pada tumpuan pilar, berdasarkan perbandingan pengaruh beban merata yang digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.4 Perbandingan dua-tiga bentang menerus



Gambar 2.5 Perbandingan 4-5 bentang menerus

Kombinasi 2 bentang (I) menerus dengan momen negatif maksimum $0,125 pl^2$ akibat beban merata (p) menjadi besaran yang mewakili kombinasi 3-5 bentang menerus – Gambar 2.4 dan 2.5. Untuk pengaruh dua beban terpusat (P) dengan jarak antara $l/3$, momen negatif maksimum di tumpuan pilar diperhitungkan sebesar $-0,333 Pl$ (Sumber : Beton-kalender 1971, Pustaka 12). Momen negatif diafragma masih dikurangi oleh momen positif, yang menjadi seimbang dalam jangka waktu panjang.

Bentang tunggal dengan momen positif maksimum tengah bentang $0,125 pl^2$ akibat beban merata dan $\frac{1}{4} Pl$ akibat beban terpusat. Momen positif dalam dua bentang menerus menjadi $0,096 pl^2$ akibat beban merata dan $0,203 Pl$ akibat beban terpusat. Reduksi momen sampai ~80 persen memperbesar daya pikul gelagar I komposit dalam sistem menerus sebanyak ~20 persen. Reduksi tersebut menjadi lebih efisien bila tinggi gelagar dibuat variabel sepanjang bentang, seperti pada gelagar boks segmental dengan pelaksanaan kantilever bebas – Gambar 2.6.

2.4 Kapasitas gelagar monolitik terhadap segmental

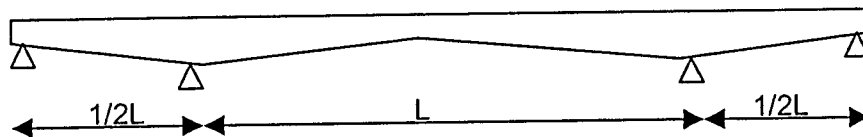
Kapasitas gelagar monolitik yang sama kuat dengan gelagar segmental akan terbukti dalam percobaan pembebanan dalam penelitian ini. Kapasitas gelagar segmental akan terpelihara dengan sistem sambungan yang bersifat monolitik. Sambungan tidak monolitik akan menyebabkan penurunan kapasitas dan penurunan umur pelayanan, mengingat lebar retak pada sambungan akan menyebabkan ulur tendon setempat dan konsentrasi tegangan setempat. Keuntungan dan kerugian antara gelagar segmental/monolitik dijelaskan dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian gelagar segmental/monolitik

Butir pembanding	Gelagar monolitik	Gelagar segmental
1. Biaya transportasi	~ biaya beton	~1/3 biaya beton
2. Prategang parsial, hemat tendon	OK	OK, letak sambungan diluar titik kritis, jumlah segmen ganjil
3. Prategang penuh, tambah tendon	OK	OK, letak sambungan tidak masalah pada keadaan daya layan, jumlah segmen ganjil untuk mendukung keadaan ultimit
4. Integritas struktur	OK	OK, sesuai butir 2 dan 3
5. Umur pelayanan	OK	OK, sesuai butir 2 dan 3

2.5 Gelagar boks segmental alternatif

Gelagar boks segmental cor di tempat dengan sistem pelaksanaan kantilever bebas telah diterapkan untuk bentang panjang pada jembatan : Rantau Berangin, Citarum - Rajamandala, Maos-Kesugihan, dan jalan layang Pasupati.



Gambar 2.6 Rencana standar gelagar boks menerus

Standarisasi gelagar boks dengan tiga variasi bentang total 120m (30+60+30m), 140m (35+70+35m), dan 160m (40+80+40m) dalam proses perencanaan oleh konsultan Bina Marga. Mutu beton ditetapkan $f_c' 35$ MPa sesuai cara pengecoran di tempat dan kemampuan daerah. Pengecekan desain akan dilakukan oleh Pusjatan dalam tahun mendatang (2007) sebagai bagian dari advis teknik. Standar ini mencapai bentangan panjang dan merupakan alternatif bermanfaat untuk gelagar segmental I komposit. Setelah pengecekan desain, standar ini diresmikan dan diluncurkan oleh Bina Marga. Perbandingan standar usulan untuk gelagar segmental tipe boks dan gelagar I komposit dijelaskan dalam Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Perbandingan gelagar segmental tipe boks / I komposit

Butir pembanding	Gelagar boks	Gelagar I komposit
1. Bentang maksimum	$75+150+75 = 300\text{m}$	Kelipatan 50m
2. Mutu beton	$f_c' 35$ MPa	$f_c' 65$ MPa
3. Pembetonan	Cor di tempat	Pracetak di pabrik
4. Sambungan segmen	Tulangan stek dan tendon	Epoksi dan tendon
5. Cara pelaksanaan	Kantilever bebas	Pengangkatan/peluncuran
6. Waktu pelaksanaan	3 minggu per segmen	2 hari per gelagar, 3 minggu lantai
7. Estetika	baik	biasa

BAB III

HIPOTESA

Gelagar yang tersambung secara segmental harus memenuhi persyaratan kapasitas seperti gelagar utuh. Integritas struktur segmental, hubungan kontinuitas lantai dan gelagar jembatan, serta pengaruh penurunan pondasi menjadi bahan pengkajian.

Analisis dilakukan untuk kriteria dan persyaratan keutuhan sistem lantai dan gelagar menerus diatas pilar serta keutuhan sambungan antara segmen ke segmen. Hasil eksperimen prototipe dan pengamatan lapangan yang diperoleh menjadi data aktual yang di-verifikasi terhadap hasil eksperimen luar negeri.

BAB IV

METODOLOGI

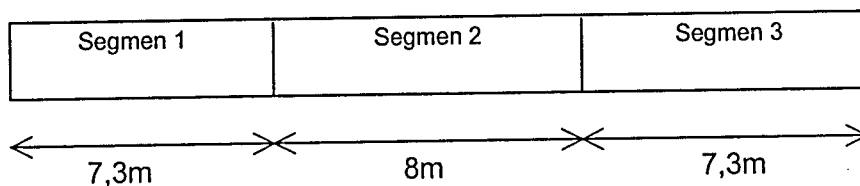
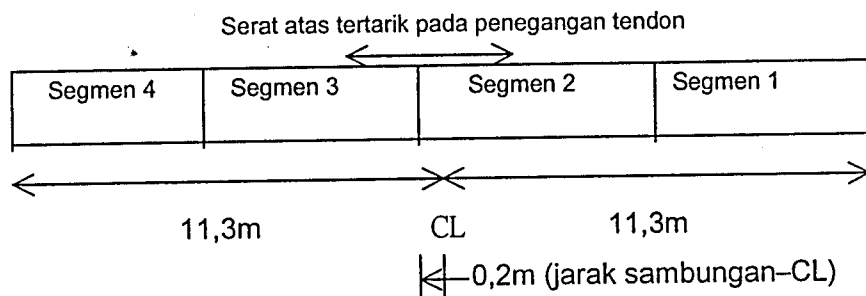
4.1 Kerangka Pemikiran

4.1.1 Keutuhan sambungan pada penegangan tendon

Menurut pengalaman eksperimental (Pustaka 4), sambungan akan mulai retak atau terbuka pada batas tegangan tarik $0,33 (f_c')^{0.5}$ MPa. Sebagai contoh numerik, tegangan + 2,76 MPa untuk mutu beton f_c' 70 MPa adalah batas keutuhan sambungan. Kesimpulan adalah bahwa letak sambungan harus direncanakan agar tegangan tarik < batas tegangan tarik $0,33 (f_c')^{0.5}$.

Tegangan tarik sambungan pertama-tama terjadi di serat atas gelagar pada saat penegangan tendon. Bentang prototipe 22,6m telah dibuat dalam 4 bagian (Gambar 3.1) : 5,3m +5,8m +6,2m +5,3m. Dengan cara pembagian segmen tersebut terdapat sambungan pada 20 cm terhadap tengah bentang, dimana terjadi tegangan tarik teoritis serat atas gelagar sebesar 2 MPa.

Dengan membagi bentang 22,6m dalam 5 bagian : 4,3m+4m+6m+4m+4,3m akan terjadi tegangan tarik teoritis serat atas di sambungan sebesar 1,1 MPa, yang masih dapat diperkecil menjadi 0,13 MPa dengan membagi gelagar dalam 3 bagian : 7,3 m+ 8 m+7,3 m (Gambar 3.2).



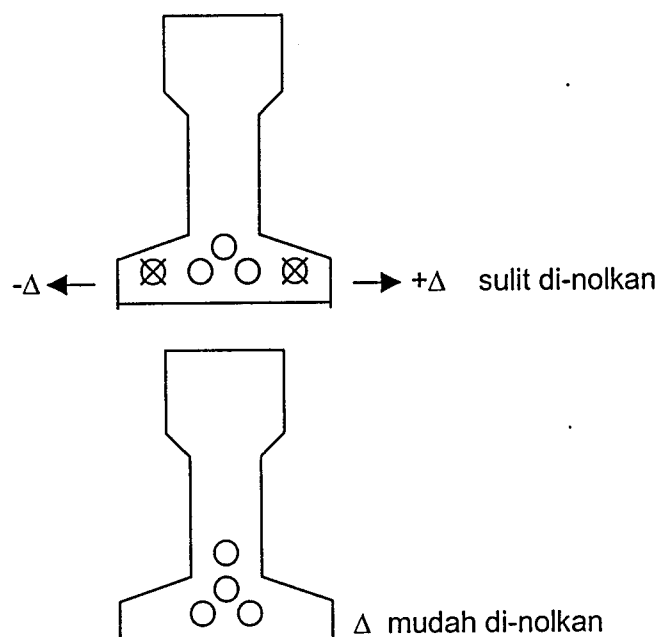
4.1.2 Keutuhan sambungan pada beban rencana

Pada beban rencana dan prategang tak terhingga (keadaan daya layan SLS) di tengah bentang gelagar prototipe terjadi : tegangan tekan di serat atas gelagar sebesar 23,725 MPa < $0,4 (f_c' 65) = 26$ MPa, dan tegangan tarik di serat bawah gelagar sebesar 3,01 MPa yang dipikul oleh tulangan tarik tambahan 4 diameter 12mm. Jadi secara teoritis tidak terjadi tegangan tarik bila gelagar utuh tanpa sambungan.

Mengingat pada sambungan epoksi tidak ada tulangan tarik tambahan dan sambungan berdekatan dengan titik maksimum di tengah bentang, maka pergeseran titik kritis dari tengah bentang ke letak sambungan dapat terjadi. Fenomena ini menjadi bahan pengamatan dalam evaluasi pengujian beban pada gelagar prototipe, yang dibahas lebih lanjut dalam Bab v.

4.1.3 Penempatan tendon

Penerapan beton mutu tinggi menghemat dimensi penampang gelagar, dan di segi lain mempersempit penempatan tendon yang jumlahnya bertambah. Letak tendon yang berjauhan dalam arah horisontal (eksentris) terhadap titik pusat penampang menyebabkan lendutan ke samping yang sulit di-nolkan selama tahapan penegangan tendon. Hal ini disebabkan karena jumlah jack hanya satu, sehingga tendon tidak dapat ditarik secara simetris, tetapi gaya tendon dinaikkan secara bertahap dari sisi kiri dan kanan secara bergantian. Eksentrisitas tendon dalam proses penarikan dengan demikian perlu dibatasi dengan meletakkan maksimum dua tendon dalam satu baris. Penggunaan tipe tendon yang lebih besar akan bermanfaat untuk mengurangi jumlah tendon. Pada pembuatan prototipe gelagar segmental telah digunakan satu tipe tendon dengan 7 strand, sedangkan di luar standar tersebut masih terdapat tipe dengan jumlah strand lebih besar.



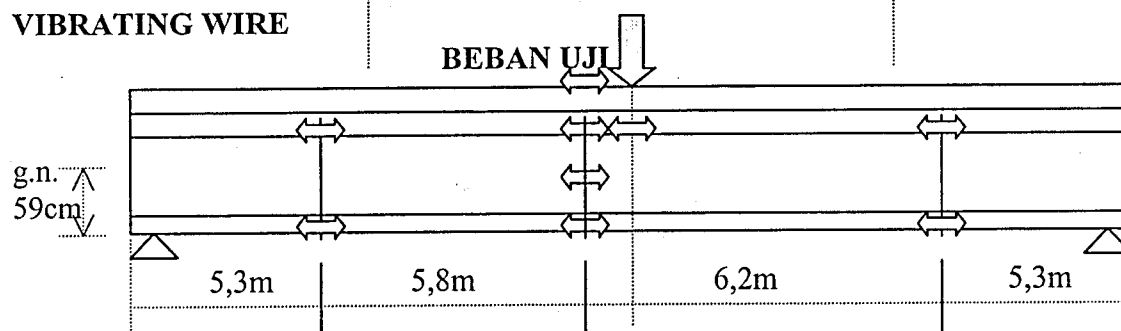
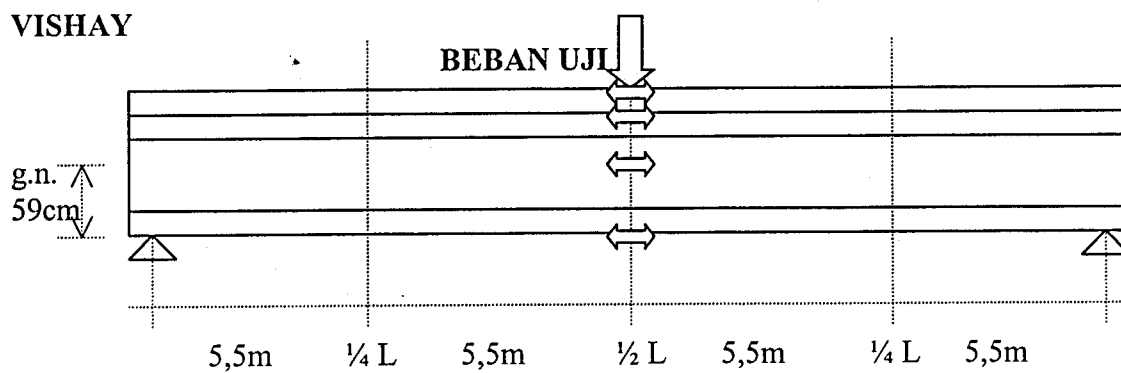
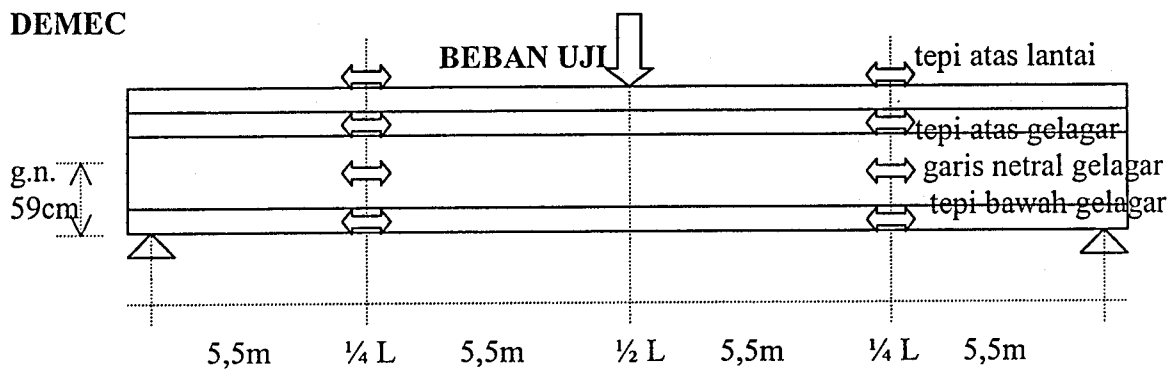
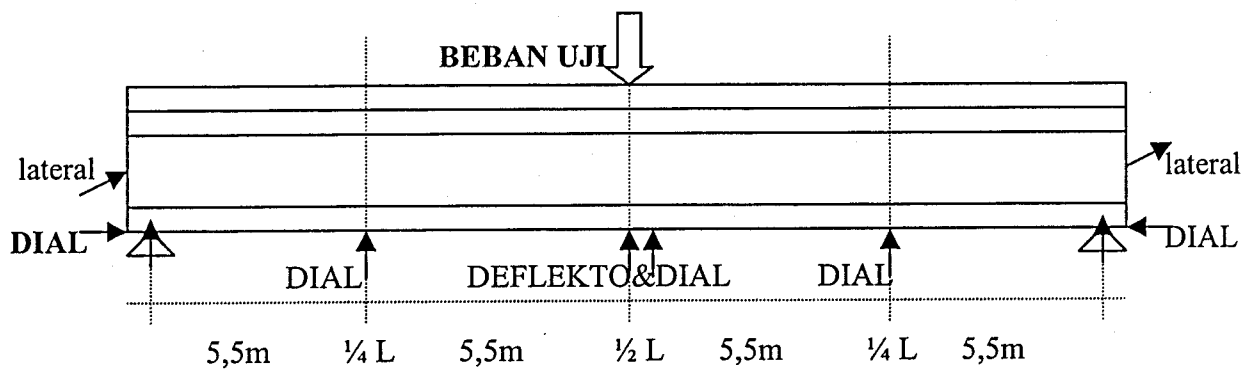
Gambar 4.3 Contoh penempatan tendon

4.2 Lokasi

Lokasi penelitian dan pembuatan prototipe dilaksanakan di proyek pengadaan komponen jembatan beton pracetak Buntu untuk gelagar monolitik dan gelagar segmental dalam tahun pengkajian 2002 dan 2005-2006.

4.3 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan peralatan 'strain gauge', deflektometer, 'dial' arloji ukur, yang dipasang sepanjang gelagar prototipe dan di-deteksi selama percobaan pembebanan dengan cara sebagai berikut :



Gambar 4.4 Penempatan sensor pada prototipe gelagar segmental

Penempatan sensor regangan di tengah bentang (bagian utuh dan sambungan segmen) dan $\frac{1}{4}$ bentang gelagar (sambungan segmen) untuk sensor Demec Gauge, Kyowa Gauge, Vibrating wire, dan di garis netral $\frac{1}{4}$ bentang untuk mendeteksi regangan geser (Demec).

Pembebanan percobaan dilakukan sebagai berikut :

- Kenaikan beban bertahap sebesar 1 ton yang diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan. Setiap kenaikan 5 ton, beban ditahan 15 menit
- Pada beban rencana 30,5 tf : beban ditahan 15 menit, kemudian diikuti pembacaan gauge regangan dan dial lendutan
- Kenaikan beban bertahap sebesar 1 ton diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan, perhatikan retak awal pada serat bawah di tengah bentang/sambungan
- Pada beban retak lentur awal ~ 45 ton : beban ditahan 15 menit, kemudian diikuti pembacaan gauge regangan dan dial lendutan
- Kenaikan beban bertahap sebesar 1 ton yang langsung diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan. Setiap kenaikan 5 ton, beban ditahan 15 menit
- Pada beban retak geser awal, bila ada : beban ditahan 15 menit, kemudian diikuti pembacaan gauge regangan dan dial lendutan
- Kenaikan beban bertahap sebesar 1 ton yang langsung diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan. Setiap kenaikan 5 ton, beban ditahan 15 menit
- Pada beban ultimit rencana 51,8 tf : beban ditahan 15 menit, kemudian diikuti pembacaan gauge regangan dan dial lendutan
- Kenaikan beban bertahap sebesar 1 ton yang langsung diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan. Setiap kenaikan 5 ton, beban ditahan 15 menit
- Pada beban ultimit teoritis 71,3 tf : beban ditahan 15 menit, kemudian diikuti pembacaan gauge regangan dan dial lendutan
- Penurunan beban bertahap sebesar 5 ton sampai akhirnya beban menjadi nol, yang tiap kali penurunan ditahan selama 15 menit kemudian diikuti dengan pembacaan gauge regangan dan dial lendutan

Percobaan pembebanan merupakan simulasi dari beban lalu lintas, dengan menahan beban selama 15 menit dianggap terjadi pengulangan beban. Dengan demikian beban statis dapat mencerminkan beban dinamis juga.

Besarnya lendutan sisa yang terukur setelah beban di-nol-kan kembali menunjukkan tingkat elastis struktur yang telah dibebani secara ultimit plastis.

Beban rencana tidak boleh menyebabkan kerusakan atau retakan rambut, karena merupakan beban sehari-hari yang kemungkinan terlampaui 5% dalam waktu 1 tahun pelayanan.

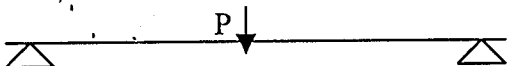
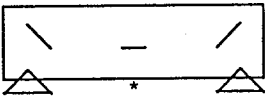
Retak lentur awal pada struktur beton prategang terjadi diatas beban rencana, hal mana lebih menguntungkan dibanding struktur beton bertulang dimana retak awal berupa retak rambut terjadi pada tingkat beban rencana.

4.4 Teknik Analisis

Regangan tarik beton 15×10^{-5} adalah batas kemampuan tarik untuk beton murni. Regangan lebih besar ditahan oleh tulangan / tendon dalam gelagar monolitik, atau oleh sambungan epoksi / tendon dalam gelagar segmental. Batas tegangan tarik untuk keutuhan sambungan adalah $0,33\sqrt{f_c'} = 2,85 \text{ MPa}$ yang ekuivalen dengan regangan tarik 77×10^{-5} . Sambungan epoksi akan bersifat seperti sambungan kering (tanpa epoksi) dengan terlampauinya tegangan tarik ijin $0,33\sqrt{f_c'}$.

Pengamatan tahap beban percobaan dilakukan sesuai Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Beban percobaan pada prototipe

		
Beban terpusat P (tonforce), Δ mm lendutan tengah bentang	Keadaan batas	Retakan serat bawah gelagar
Beban nol , Δ mm 30,5 tf beban rencana, $\Delta \sim 1,03 P \sim 31,5$ mm beban ~45 tf , retak lentur, Δ 46,4 mm beban ~45 tf, retak geser tidak boleh terjadi 51,8 tf beban ultimit rencana (FK 1,7) , $\Delta > 53,4$ mm 71,3tf beban ultimit runtuh (FK 2,5), $\Delta >> 73,4$ mm	Berat sendiri gelagar komposit Daya layan rencana SLS Retak lentur awal (*) di tengah bentang di tepi bawah balok Retak geser awal di $\frac{1}{4} L = 5,5\text{m}$ dari tumpuan Ultimit ULS rencana (elastis) Ultimit ULS runtuh (plastis)	Utuh utuh, tidak retak $\rightarrow 5,5\text{m} \quad 5,5\text{m} \leftarrow$  retak struktural retak runtuh / retak tembus

Yang perlu diobservasi pada percobaan pembebanan adalah beban retak awal lentur (*) dan beban retak awal geser (**) yang diatas 30,5 tf tetapi lebih kecil dari 51,8 tf, mengingat sistem prategang parsial maka beban retak akan lebih dekat ke beban rencana. Faktor keamanan beban rencana terhadap ultimit teoritis adalah 1,7-2,5 yang memenuhi persyaratan desain beton prategang penuh. Lendutan teoritis di tengah bentang dihitung dengan rumus $\frac{1}{48} \frac{Pl^3}{EI}$ atau disederhanakan menjadi : Δ (mm) = 1,03 x beban P (tf) untuk $f_c' 65$ MPa.

BAB V

HASIL PENELITIAN/PENGEMBANGAN/PENGAJIAN

5.1 Hasil Uji Gelagar Segmental

5.1.1 Lawan Lendutan pada Penyambungan Segmen dan Penegangan tendon

Kekuatan beton target dari benda uji adalah 81 MPa pada umur 28 hari (Tabel 5.2). Kekuatan beton karakteristik diuji dengan pengukuran lawan lendutan dan regangan pada penegangan tendon pada umur beton 21 hari. Kekuatan beton karakteristik berdasarkan lawan lendutan terukur 4.04 cm, dievaluasi sebesar $f_c' = 71$ MPa untuk umur beton 21 hari.

Lawan lendutan teoritis 4,46cm untuk $f_c' = 65$ MPa dimana modulus elastisitas $E = 37000$ MPa, dengan rumus $E = 4700 \times (f_c')^{0.5}$. Lawan lendutan terukur di tengah bentang sebesar 4,04 cm yang identik dengan $E = 4,46/4,04 \times 37000 = 40846$ MPa untuk $f_c' = 75$ MPa. Bila diperhitungkan secara linier diperoleh $f_c' = 4,46/4,04 \times 65 = 71$ MPa.

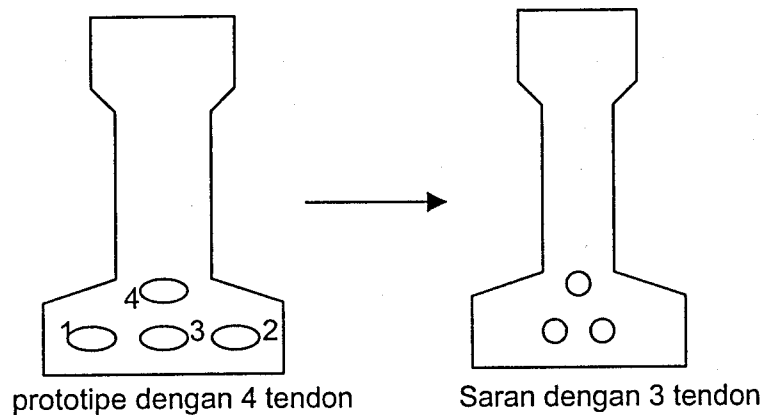
Tabel 5.1.a Lawan lendutan vertikal tengah bentang terukur ($f_c'71$ MPa) vs teoritis ($f_c'65$ MPa) dengan cara pengukuran arloji ukur (cm)

No Tahap	% Penarikan tendon	Rekaman dial ukur	Δ Aktual / Teoritis (cm)
1	0%	-	-
2	T3 = 50 %	6560	-
3	T3 = 100%	8080	0,1520
4	T2 = 50 %	13200	0,6640
5	T1 = 50 %	21205	1,4645/1,0860
6	T4 = 50 %	24200	1,7640
7	T2 = 100%	33435	2,6875
8	T1 = 100%	42540/8160	3,5980/3,5100
9	T4 = 100%	10730	3,8550
10	Selesai	12560	4,0380/4,4660

Tabel 5.1.b Lawan lendutan vertikal tengah bentang terukur ($f_c'71$ MPa) vs teoritis ($f_c'65$ MPa) dengan cara pengukuran deflektometer (cm)

No Tahap	% Penarikan tendon	Vertikal/teoritis Cm	Horisontal cm	Horisontal Cm
1	0%	0	0	0
2	T3 = 100%	0,103	0,06	-0,061
3	T2 = 50 %	0,672	-1,083	1,0381
4	T1 = 50 %	1,412	+0,708	-0,881
5	T4 = 50 %	1,765	0,675	-0,912
6	T2 = 100%	2,726	-1,183	0,76
7	T1 = 100%	3,5476	0,671	-1,342
8	T4 = 100%	3,9043	0,681	-1,42
9	Selesai	4,0276/4,466	0,689	-1,478
			Simpangan horisontal 0,8cm	

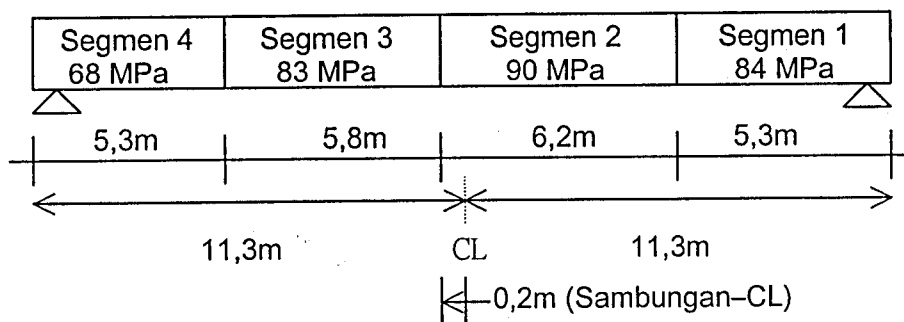
Dari hasil pengukuran lendutan diperoleh dalam arah vertikal : lawan lendutan dari arloji ukur 4,04 cm dan dari deflektometer 4,03 cm serta dalam arah horisontal : simpangan 0,8 cm dari deflektometer. Dalam desain akan datang perlu dihindari eksentrisitas yang terlalu besar dalam arah horisontal (gambar 5.1). Empat tendon dengan jumlah strand $4 \times 7 = 28$ dalam model gelagar dapat menjadi 3 tendon dengan jumlah strand $(2 \times 9) + (1 \times 10) = 28$, dan demikian eksentrisitas tendon dan simpangan dalam arah horisontal dapat diperkecil.



Gambar 5.1 Letak tendon (T1-T4) di potongan tengah bentang

Tabel 5.2 Kuat tekan benda uji beton

Benda uji 10x20cm	Segmen 1 MPa	Segmen 3 MPa	Segmen 2 MPa	Segmen 4 MPa
Umur 28 hari	87,65	81,9	89,46	75,08
Umur 28 hari	81,76	84,2	90,6	62,28
Kuat tekan target	84,705	83,05	90,03	68,68
Kuat tekan target rata-rata	81,6 MPa			
f_c'	Nilai karakteristik = 71 MPa (28 hari)			



Gambar 5.2 Pembagian segmen dalam model dengan kuat tekan target beton

5.1.2 Regangan - Tegangan pada Penyambungan Segmen dan Penegangan Tendon

Regangan tekan serat bawah tengah bentang adalah teoritis $-23,3$ MPa (tekan) dan serat atas $+2,128$ MPa (tarik). Regangan serat bawah terukur dikali dengan modulus elastisitas adalah : $(668-1262)$ mikrostrain (Tabel 5.3) , dan dikalikan modulus elastisitas menjadi tegangan = $-594 \times 10^{-6} \times E = -23,3$ MPa. Modulus elastisitas di-evaluasi menjadi $39225 \text{ MPa} = 4700 \times (f_c')^{0.5}$, sehingga mutu beton karakteristik 70 MPa berdasarkan regangan, yang mendekati 71 MPa berdasarkan lawan lendutan.

Tabel 5.3 Regangan horisontal memanjang di tengah bentang pada serat bawah gelagar dengan pengukuran gauge vishay dan vibrating wire

No Tahap	% Penarikan tendon	Rekaman regangan vishay ($\times 10^{-6}$)	ϵ Aktual vishay	Vibrating wire hz (ϵ)
1	0%	1318	0	900,06(82,13)
2	T3 = 50 %	1262 stel ulang	0	0
3	T3 = 100%	1212	-50	890,8(-51,13)
4	T2 = 50 %	1057	-205	862,94(-202,48)
5	T1 = 50 %	1070	-192	865,48(-188,84)
6	T4 = 50 %	984	-278	850,23(-270,29)
7	T2 = 100%	775	-487	807,08(-494,72)
8	T1 = 100%	788	-474	810,1(-479,31)
9	T4 = 100%	687	-575	792,38(-569,14)
10	Selesai (~30 menit)	668	$\epsilon = -594$ $\sim -587,76$	788,67 ($\epsilon = -587,76$)

5.1.3 Pembagian segmen

Pembagian model gelagar $22,6\text{m}$ dilaksanakan dalam 4 segmen : $5,3\text{m} + 5,8\text{m} + 6,2\text{m} + 5,3\text{m} = 22,6\text{m}$ (Gambar 5.1). Dengan cara pembagian segmen tersebut terdapat sambungan pada 20 cm terhadap tengah bentang, dimana terjadi tarik serat atas gelagar sebesar 2 MPa (Tabel 5.4). Serat tertarik pada saat penegangan tendon akan tertekan oleh beban lantai komposit. Serat tertarik pada saat penegangan tendon untuk desain standar harus dihindari dengan menggunakan jumlah segmen ganjil yaitu 5 atau 3 segmen sehingga tidak terdapat sambungan tengah bentang.

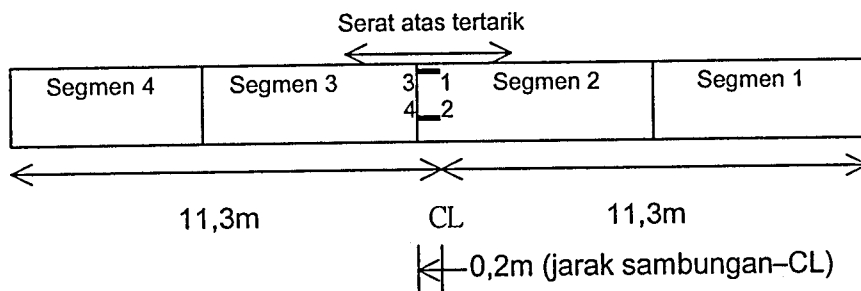
Dengan terjadinya regangan tarik $131,80$ mikrostrain di serat atas sambungan (Tabel 5.4) ternyata bahwa sambungan tertarik dan terbuka pada serat atas yang mengalami tegangan tarik beton $131,80 \times 10^{-6} \times 39225 = 5,17 \text{ MPa}$. Tegangan tekan di serat bawah sambungan adalah $658,59 \times 10^{-6} \times 39225 = 25,8 \text{ MPa} > 23 \text{ MPa}$ teoritis, berarti serat bawah lebih tertekan oleh terbukanya sambungan di tepi atas - Gambar 5.3.

Tegangan tarik teoritis adalah $+2,1$ MPa di serat atas CL (tengah bentang), sedangkan yang terukur $98,80 \times 10^{-6} \times 39225 = +3,8 \text{ MPa} > 2,1 \text{ MPa}$, berarti tegangan tarik di CL yang utuh masih terpengaruh oleh terbukanya serat atas pada sambungan $0,2\text{m}$ disampingnya (Gambar 5.3). Tegangan tekan serat bawah di CL sesuai nilai teoritis 23 MPa dan tidak terpengaruh oleh sambungan segmen.

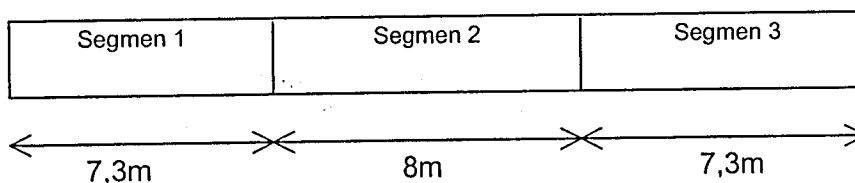
Menurut pengalaman eksperimental (Pustaka 4), sambungan akan mulai retak atau terbuka pada batas tegangan tarik $0,33 (f_c')^{0,5}$ MPa atau + 2,76 MPa untuk f_c' 70 MPa, yang dalam kasus ini mendekati nilai teoritis ~2,1 MPa. Kesimpulan adalah bahwa letak sambungan harus direncanakan agar tegangan tarik $\ll$ batas tegangan tarik $0,33 (f_c')^{0,5}$. Dengan membagi gelagar 22,6m dalam 5 bagian : 4,3m+4m+6m+4m+4,3m akan terjadi tegangan tarik serat atas di sambungan sebesar 1,1 MPa, yang masih dapat diperkecil menjadi 0,13 MPa dengan membagi gelagar dalam 3 bagian : 7,3 m+ 8 m+7,3 m (Gambar 5.4).

Tabel 5.4 Regangan mikrostrain di CL vs sambungan segmen (0,2m terhadap CL) dengan pengukuran vibrating wire

No tahap	Tahap penarikan tendon	Vw 01 CL serat atas	Vw 02 CL serat bawah	Vw 03 Sambungan serat atas	Vw 04 Sambungan serat bawah
1	0				
2	T3=50%	0	0	0	0
3	T3=100%	-17,53	-51,13	-15,14	-55,61
4	T2=50%	-62,16	-202,48	-55,83	-225,14
5	T1=50%	32,39	-188,84	44,43	-218,00
6	T4=50%	28,95	-270,29	44,71	-308,06
7	T2=100%	-5,13	-494,72	13,74	-555,40
8	T1=100%	94,30	-497,31	120,38	-543,52
9	T4=100%	96,80	-569,14	129,15	-640,06
10	Selesai	98,80 tarik	-587,76 tekan	131,80 tarik	-658,59 tekan



Gambar 5.3 Pengukuran vibrating wire no 3 (tarik dan terbuka) & no 4 (tekan) di sambungan, dan no 1 (tarik) & no 2 (tekan) di CL bagian utuh

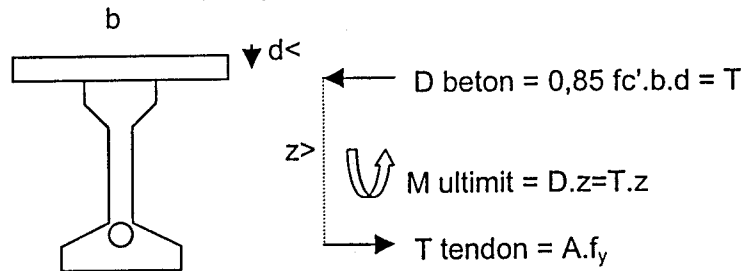


Gambar 5.4 Rencana sambungan segmen untuk menghindari tegangan tarik

5.2 Kapasitas gelagar monolitik terhadap gelagar segmental

5.2.1 Pengaruh mutu beton pada kapasitas ultimit

Keadaan batas ultimit (ULS) merupakan keadaan leleh dari tulangan dan beton. Gaya ultimit dari tulangan/tendon (T) diimbangi oleh blok tekanan ultimit (D) dalam lantai beton. Kapasitas ultimit untuk model gelagar segmental komposit (f_c' adalah 75 MPa untuk gelagar dan 80 MPa untuk lantai) akan lebih besar dari model gelagar monolitik komposit (f_c' 65 MPa untuk gelagar dan lantai). Tinggi blok tekanan ultimit dalam lantai (D) sebanding dengan 0,85 kali kuat tekan f_c' , makin tinggi kuat tekan, makin kecil tinggi blok tekan, dan makin besar lengan momen dalam (z) antara D dan T. Momen ultimit adalah perkalian T dengan z, sama dengan D kali z. Kenaikan kapasitas ultimit untuk dimensi gelagar dan tulangan/tendon yang sama pada mutu beton lebih tinggi, dibuktikan melalui percobaan pembebanan pada model gelagar segmental 71-80 MPa (rata-rata 75 MPa) vs gelagar monolitik 65 MPa.



Gambar 5.5 Skema gaya ultimit

5.2.2 Evaluasi uji beban gelagar segmental vs monolitik

Evaluasi berdasarkan pelaksanaan dan hasil uji beban dilakukan secara eksperimental teoritis dengan uraian sebagai berikut :

- **Gelagar segmental**
Lendutan teoritis Δ mm dapat dihitung dengan rumus $0,99 P$ (tf) untuk gelagar segmental komposit berdasarkan modulus elastis $E = 37000$ MPa pada mutu beton 75 MPa. Gelagar bersifat utuh dan keadaan elastis sampai beban uji 53 tf. Peningkatan beban dalam keadaan plastis dilakukan sampai 64 ton dimana modulus elastis Young menurun menjadi 25800 MPa karena penyebaran retakan struktural - Tabel 5.5.
- **Gelagar segmental vs monolitik**
Gelagar bersifat elastis sampai beban uji 53 tf, sesuai nilai ultimit teoritis untuk gelagar segmental (52 tf) dan monolitik (49 tf) – Tabel 5.5 dan 5.6, Grafik 5.1 dan 5.2. Pengujian model skala penuh menunjukkan bahwa gelagar segmental (75 MPa) dan monolitik (65 MPa) yang direncanakan dengan dimensi penampang dan jumlah tendon prategang identik, mempunyai **kapasitas beban SLS – ULS** yang **identik** juga. Perbedaan terletak pada lendutan yang langsung dirumuskan oleh modulus elastis beton. Pada beban uji sama, lendutan model gelagar segmental adalah $0,99/1,206 = 82\%$ terhadap model gelagar monolitik – Tabel 5.5. dan 5.6. **Makin tinggi mutu beton, makin kecil lendutan** untuk dimensi penampang dan penulangan yang sama.

Tabel 5.5. Beban uji vs lendutan tengah bentang gelagar segmental (75 MPa)

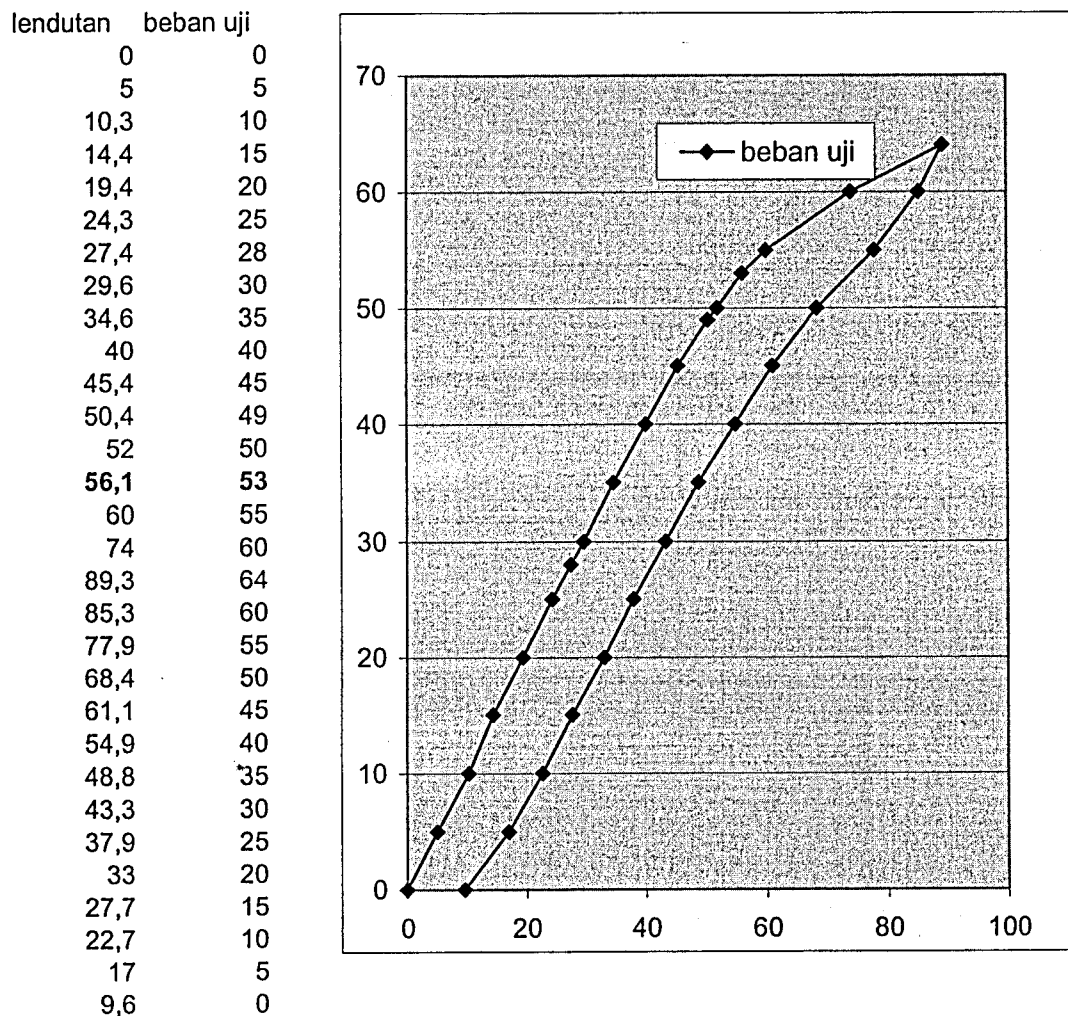
Beban uji (tf)	Lendutan (mm) deflekto ~ dial	$\Delta=1,03 P$ mm E=36000MPa Ref. Fc' 65 MPa	$\Delta=0,99 P$ mm E=37000MPa Beton aktual	E MPa Hasil Uji beban
30 tf rencana	29,6mm~29,4mm	30,9mm	29,7 mm	37000 elastis
45 tf retak	45,3mm~45,6mm	46,4mm	44,6 mm	37000 elastis
49 tf	50,0mm~50mm	50,5	48,5 mm	36000 elastis
52 tf ultimit	54,2mm~54,6mm	53,5mm	51,5 mm	35400 elastis
53 tf	56 mm~56,5mm	54,6mm	52,5 mm	35000 elastis
55 tf	60 mm~60,4mm	56,7mm	54,5 mm	33000 plastis
56 tf	62,2mm~62,3mm	57,7mm	55,4 mm	32400 plastis
60 tf	74 mm~74,2mm	61,8mm	59,4 mm	29190 plastis
64 tf	89,3mm~89,6mm	65,9mm	63,4 mm	25800 plastis

Tabel 5.6. Beban uji vs lendutan tengah bentang gelagar monolitik (65 MPa)

Beban uji (tf)	Lendutan (mm)	$\Delta=1,03 P$ mm E=36000MPa Ref. Fc'65MPa	$\Delta=1,206 P$ mm E=30750 MPa Beton aktual	E MPa Hasil Uji beban
28,5 tf rencana	34,4mm	29mm	34,4mm	30750 elastis
45 tf retak	53,5mm	46,4mm	54,3mm	31213 elastis
49 tf ultimit	58,9mm	50,5mm	59,1mm	30870 elastis
53 tf	65,3mm	54,6mm	63,9mm	30118 elastis
55 tf	70,05mm	56,7mm	66,33mm	29135 plastis
56 tf	71,3mm	57,7mm	67,5mm	29145 plastis
56,5 tf	75,07mm	58,2mm	68,1mm	27929 plastis

Lawan lendutan awal sebelum uji beban pada gelagar segmental komposit adalah 31mm yang terukur di tengah bentang, serta 17mm dan 19 mm di $\frac{1}{4}$ dan $\frac{3}{4}$ L. Lawan lendutan teoritis adalah 7mm di tengah bentang setelah pemasangan lantai, bila tidak memperhitungkan pengaruh rangkai dan susut beton. Bila rangkai dan susut dalam waktu 2 bulan dari proses pengerasan gelagar, penarikan tendon sampai pengerasan lantai komposit diperhitungkan, lawan lendutan gelagar adalah 67,7 mm (dibanding 44,6mm pada saat penegangan tendon dimana umur beton ~ 3 minggu) dan menjadi 30mm (mendekati lendutan terukur sebesar 31mm dengan umur beton 2 bulan pada saat pengujian beban dimulai) pada gelagar komposit. Gelagar beton prategang mengalami rangkai dan susut yang tergantung waktu (*time dependent*). Dalam percobaan ini, lawan lendutan gelagar meningkat asimtotis dari 44,6mm (1 bulan) – 67,7mm (2 bulan) – 75,4mm (3 bulan) - 97,7mm (500 hari) – 122,9mm (10000 hari). Pengaruh rangkai dan susut bersifat parasitis dalam 15% kehilangan gaya prategang jangka panjang, tetapi menguntungkan dalam men'distribusi'kan lawan lendutan jangka panjang.

Grafik 5.1. Beban uji vs lendutan tengah bentang **gelagar segmental**
lendutan sisa 9,6 mm, kondisi linier/elastis sampai beban 53 ton > batas ultimit



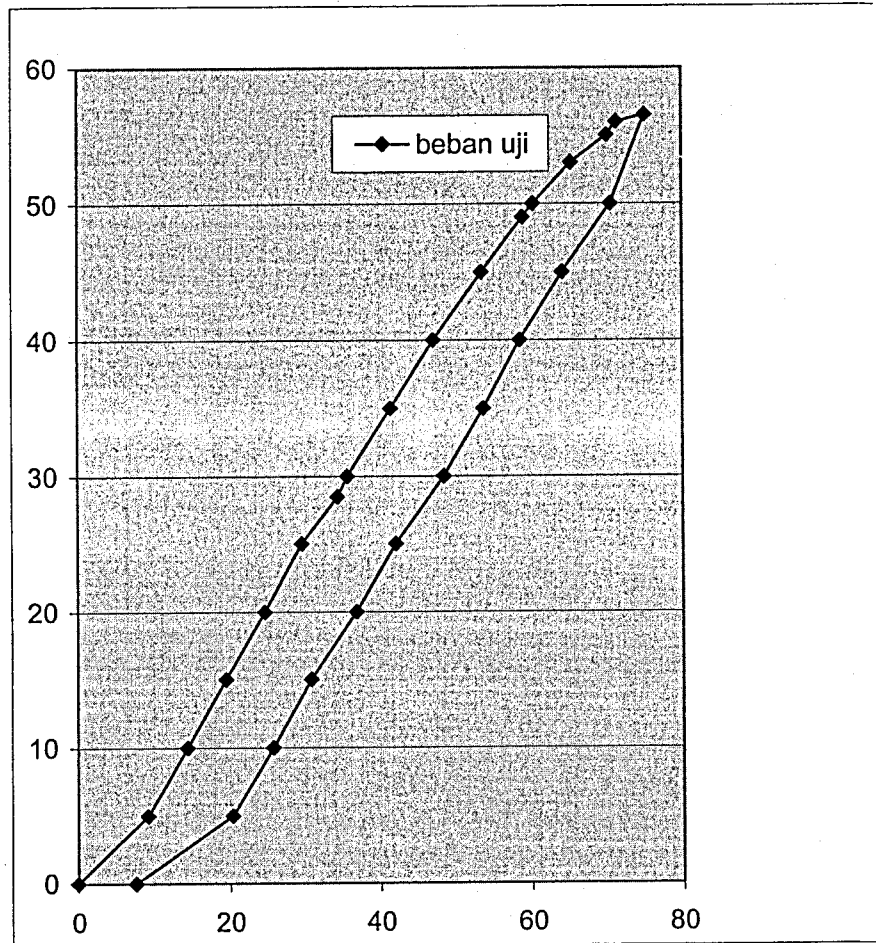
Sebagai pengecekan terhadap penurunan perletakan di ujung gelagar segmental, pengukuran lendutan di $\frac{1}{4} L$ dan $\frac{3}{4} L$ menunjukkan kesamaan – Tabel 5.7 - berarti pengaruh penurunan perletakan dapat di-eliminir.

Tabel 5.7 Lendutan di $\frac{1}{4}$ dan $\frac{3}{4} L$ pada uji beban gelagar segmental

Beban ton	Lendutan $\frac{1}{4} L$ (mm)	$\approx$ Lendutan $\frac{3}{4} L$ (mm)
10	6,8	6,9
20	13	13
30	20	21
45	31	32
55	41	43
64	57	61
50	44	48
25	25	29
0	6	8

Grafik 5.2. Beban uji vs lendutan tengah bentang **gelagar monolitik**
lendutan sisa 7,6mm, kondisi linier/elastis sampai beban 53 ton > batas ultimit

lendutan	beban uji
0	0
9,17	5
14,4	10
19,5	15
24,7	20
29,6	25
34,4	28,5
35,7	30
41,4	35
47,1	40
53,5	45
58,9	49
60,3	50
65,3	53
70,05	55
71,3	56
75,07	56,5
70,5	50
64,1	45
58,5	40
53,7	35
48,5	30
42,1	25
36,9	20
30,9	15
25,8	10
20,4	5
7,6	0



Regangan tarik beton 15×10^{-5} adalah batas kemampuan tarik untuk beton murni. Regangan lebih besar ditahan oleh tulangan / tendon dalam gelagar monolitik, atau oleh sambungan epoksi / tendon dalam gelagar segmental. Retak lentur awal (rambut) terjadi pada beban uji 45 ton untuk gelagar monolitik (di tengah bentang terjadi regangan tarik 63×10^{-5} ekuivalen tegangan tarik 2 MPa) dan gelagar segmental (di sambungan 20 cm terhadap tengah bentang, terjadi regangan tarik 130×10^{-5} ekuivalen tegangan tarik 4,8 MPa berarti sambungan terbuka). Di tepi bawah sambungan gelagar segmental, retakan bertambah lebar dengan meningkatnya regangan sampai 774×10^{-5} untuk beban uji 64 ton. Batas tegangan tarik untuk keutuhan sambungan adalah $0,33\sqrt{f_c'} = 2,85$ MPa yang ekuivalen dengan regangan tarik 77×10^{-5} . Pada tengah bentang yang sebenarnya lokasi momen maksimum, tidak terjadi penambahan regangan ($33,6 \times 10^{-5}$ - $37,5 \times 10^{-5}$) karena tertekan oleh terbukanya sambungan disampingnya. Pada beban rencana 30tf sampai beban retak 44 tf (~1,5 kali beban rencana), keutuhan sambungan segmen terpelihara – Tabel 5.8. Diatas beban retak 45 tf, sambungan epoksi akan bersifat seperti sambungan kering (tanpa epoksi) dengan terlampauinya tegangan tarik ijin $0,33\sqrt{f_c'}$.

Hasil eksperimen menunjukkan perlemahan sambungan bila diletakkan dalam daerah momen maksimum. Pembagian bentang dalam 4 segmen dengan demikian kurang baik, dan dianjurkan untuk membagi bentang dalam 3 atau 5 segmen. Kekuatan gelagar segmental identik dan sama kuat dengan gelagar monolitik – Tabel 5.8 dan 5.11 – dimana pada beban uji maksimum 56 tf (diatas batas ultimit 49 tf) terjadi regangan tarik $408,7 \times 10^{-5}$ (segmental) dibanding 371×10^{-5} (monolitik) dengan lebar retak 0,2mm.

Tabel 5.8 Beban uji vs regangan tarik tengah bentang gelagar segmental

Beban uji	Regangan tarik (Kyowa) 1/2L = bagian utuh	Regangan tarik (Vibrating wire) 1/2L+0,2m = bagian sambungan
30 tf rencana (utuh)	$33,6 \times 10^{-5}$	33×10^{-5}
44 tf (utuh)	$51,7 \times 10^{-5}$ tegangan tarik 1,9 MPa	$58,3 \times 10^{-5}$ tegangan tarik 2,1MPa
45 tf retak awal di sambungan	$47,3 \times 10^{-5}$ tegangan tarik 1,6 MPa	130×10^{-5} tegangan tarik 4,8 MPa
49 tf ultimit (model monolitik)	$46,9 \times 10^{-5}$	222×10^{-5}
52 tf ultimit (model segmental)	$47,1 \times 10^{-5}$	$303,6 \times 10^{-5}$
53 tf (batas linier)	$46,5 \times 10^{-5}$	362×10^{-5}
55 tf	$44,8 \times 10^{-5}$	384×10^{-5} lebar retak >0,2mm
56 tf	44×10^{-5}	$408,7 \times 10^{-5}$
60 tf	$44,8 \times 10^{-5}$	558×10^{-5}
64 tf (beban uji maks) sisi kiri :	$37,5 \times 10^{-5}$ tegangan tarik 0,97MPa	774×10^{-5} lebar retak > 0,4mm
sisi kanan :	$67,4 \times 10^{-5}$ tegangan tarik 1,7MPa	

Tabel 5.9 Regangan di tengah bentang pada gelagar segmental

Penampang	Beban 30tf	Beban 45 tf	Beban 52tf	Beban 64 tf
Atas lantai	-6,9MPa = $-18,6 \times 10^{-5}$	-11,4MPa = -31×10^{-5}	-14,5MPa = -41×10^{-5}	-18,4MPa = $-71,4 \times 10^{-5}$
Atas gelagar	$-19,5 \times 10^{-5}$	$-27,4 \times 10^{-5}$	$-31,7 \times 10^{-5}$	$-36,4 \times 10^{-5}$
Garis netral	$-0,5 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$7,4 \times 10^{-5}$	133×10^{-5} tidak berlaku
Bawah gelagar	$33,6 \times 10^{-5}$	$47,3 \times 10^{-5}$	$47,1 \times 10^{-5}$	$37,5 \times 10^{-5}$

Catatan :

- Nilai regangan di $\frac{1}{4}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang berdekatan dengan perbedaan 18,7% maksimum antara hasil pengukuran sisi kiri ($\frac{1}{4}$ L) dan kanan ($\frac{3}{4}$ L), berarti pengaruh perbedaan penurunan tumpuan dapat di-eliminir.
- Tegangan tekan di tepi atas lantai (-18,4 MPa) tidak mencapai nilai ultimit dan kurang dari tegangan tekan ijin daya layan 0,4 fc' (27 MPa), yang identik dengan hasil pengujian gelagar monolitik (Tabel 5.12),
- Regangan tekan flens/lantai ultimit (3 per mil teoritis) dalam keadaan aktual tidak tercapai

Tabel 5.10 Regangan di sambungan 20cm - tengah bentang pada gelagar segmental

Penampang	Beban 30tf	Beban 45 tf	Beban 52tf	Beban 64 tf
Atas lantai	-249×10^{-5} *	760×10^{-5} tidak berlaku	585×10^{-5} tidak berlaku	1045×10^{-5} tidak berlaku
Atas gelagar	$-26,8 \times 10^{-5}$	$-38,7 \times 10^{-5}$	$-33,7 \times 10^{-5}$	458×10^{-5} tidak berlaku
Garis netral	$2,07 \times 10^{-5}$	$-3,3 \times 10^{-5}$	$-1,07 \times 10^{-5}$	$80,9 \times 10^{-5}$
Bawah gelagar	33×10^{-5}	130×10^{-5}	$303,6 \times 10^{-5}$	774×10^{-5}

Catatan : Titik kritis di lokasi sambungan, regangan terukur pada tepi atas lantai berupa pemusatan tegangan tekan (*90 MPa pada beban rencana) dan tarik besar sekali yang 'tidak berlaku' karena seharusnya tegangan tekan seperti di tengah bentang (Tabel 5.9), pemusatan regangan dan tegangan setempat di tepi atas lantai disebabkan oleh terbukanya sambungan gelagar di tepi bawah.

Tabel 5.11 Beban uji vs regangan tarik tengah bentang gelagar monolitik

Beban uji	Regangan tarik (Demec) 2 cm terhadap tepi bawah	Regangan tarik (Kyowa) 6 cm terhadap tepi bawah
28,5 tf beban rencana	$44,3 \times 10^{-5}$ utuh	$34,2 \times 10^{-5}$
45 tf beban retak awal	63×10^{-5} retak rambut	$50,8 \times 10^{-5}$
49 tf beban ultimit rencana	$59,1 \times 10^{-5}$	51×10^{-5}
53 tf	$59,1 \times 10^{-5}$	$52,4 \times 10^{-5}$
55 tf	295×10^{-5}	tidak terbaca/putus
56,5 tf	371×10^{-5} retak 0,2mm	tidak terbaca/putus

Tabel 5.12 Regangan tengah bentang pada **gelagar monolitik**

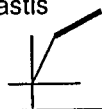
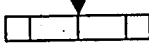
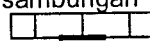
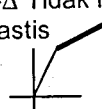
Penampang	Beban 28,5 tf	Beban 45 tf	Beban 49 tf	Beban 56,5 tf
Atas lantai	-56×10^{-5}	$-80,7 \times 10^{-5}$	$-86,7 \times 10^{-5}$	$-104,4 \times 10^{-5}$
Bawah lantai	$-17,7 \times 10^{-5}$	$-28,5 \times 10^{-5}$	$-30,5 \times 10^{-5}$	$-34,4 \times 10^{-5}$
Atas gelagar	$-28,5 \times 10^{-5}$	$-46,3 \times 10^{-5}$	$-50,2 \times 10^{-5}$	$-50,2 \times 10^{-5}$
Garis netral	$-18,7 \times 10^{-5}$	$-22,6 \times 10^{-5}$	$-19,7 \times 10^{-5}$	$-2,95 \times 10^{-5}$
Bawah gelagar	$44,3 \times 10^{-5}$	63×10^{-5}	$59,1 \times 10^{-5}$	371×10^{-5}

Catatan hasil uji regangan pada gelagar monolitik :

- Regangan tekan beton di tepi atas penampang komposit pada beban ultimit rencana (49 tf) sebesar $86,7 \times 10^{-5}$ (~ 27MPa ~ $0,4 f_c'$ ~ $0,4 \times 65$ MPa). Pada beban 56,5 tf terjadi regangan tekan $104,4 \times 10^{-5}$ (~ 29 MPa ~ $0,44 f_c'$) di tepi atas penampang komposit. Di daerah tekan tidak terjadi regangan ultimit teoritis 3 per mil, dalam pengujian ini terjadi regangan tekan 1,04 per mil pada beban 56,5 tf. Sebagai pengecekan, pada penampang melintang gelagar komposit monolitik, di garis netral pada elevasi 590mm terjadi regangan ~0, Tabel 5.12.
- Tegangan geser di $\frac{1}{4}$ bentang diukur dengan gauge dan tidak terjadi overstress sehingga tidak terjadi retak geser awal selama uji beban sampai diatas beban ultimit (56,5 tf). Berarti gelagar kuat dalam geser dan lemah dalam momen lentur hal mana menjadi konsep dasar dalam perhitungan rencana. Tegangan tekan di sensor geser pada beban uji 56,5 tf adalah -157 mikrostrain dikali modulus elastis E plastis 27929 MPa = - 4,3 MPa yang dapat dipikul oleh beton secara utuh.

Kesamaan hasil pengujian beban pada gelagar monolitik vs segmental - Tabel 5.13, menunjukkan bahwa gelagar dengan sambungan epoksi maupun gelagar utuh mengalami retak awal pada beban retak yang sama. Kapasitas daya pikul beban tidak terpengaruh oleh letak sambungan. Walaupun demikian, letak sambungan harus direncanakan di bagian momen dan geser tidak kritis, agar menghindari perpindahan titik kritis ke sambungan berdekatan dan mencegah pemusatan regangan/tegangan setempat akibat mulai terbukanya sambungan – Tabel 5.4 (pada penegangan tendon) dan Tabel 5.10 (pada beban rencana). Sambungan epoksi setelah terbuka akan bersifat sebagai sambungan kering/tanpa epoksi yang hanya terikat oleh gerigi beton dan tendon prategang. Dengan kata lain, faktor reduksi kekuatan ultimit dari 0,95 (sambungan epoksi) menurun menjadi 0,90 (sambungan kering).

Tabel 5.13 Kesamaan antara gelagar monolitik dan segmental

Tipe gelagar	Penegangan tendon -100% SLS	Beban daya layan 100% SLS	Beban retak 150% SLS	Beban ultimit $\leq 175\%$ SLS	Beban runtuh 175-200% SLS
Monolitik	Utuh, tegangan tarik tepi atas gelagar 	Gelagar utuh 	Retak awal tepi bawah gelagar 	Beban vs lendutan P-Δ Linier/elastis 	P-Δ Tidak linier/plastis 
segmental	Utuh, tegangan tarik tepi atas sambungan 	Gelagar utuh 	Retak awal tepi bawah sambungan 	Beban vs lendutan P-Δ Linier/elastis 	P-Δ Tidak linier/plastis 

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Efisiensi peningkatan mutu beton dari f_c' 40 MPa (mutu standar beton prategang) ke 65 MPa, adalah 17% untuk perpanjangan bentang dan 24% untuk penghematan berat sendiri
2. Beton mutu tinggi untuk komponen jembatan adalah optimal 65-75MPa dengan mana tercapai keseimbangan antara desain (semua mungkin dihitung) dan pelaksanaan (tidak semua mungkin dikerjakan).
3. Walaupun dimensi gelagar masih dapat diperhemat untuk bentangan menerus, dimensi dipertahankan untuk kemudahan penempatan tendon
4. Gelagar segmental I komposit untuk bentang tunggal 22m, 31m, 35m, 40m dan kelipatan bentang menerus, menggunakan desain/dimensi gelagar yang sama, sehingga membentuk satu pedoman teknis dan mencakup modifikasi diafragma pilar
5. Hasil penelitian ini berkelanjutan dalam meningkatkan mutu beton dan pola pembagian segmental dalam produksi gelagar beton pracetak selanjutnya di proyek pengadaan komponen beton pracetak untuk jembatan (Buntu)

5.1 Saran

1. Jumlah segmen dalam bentang (L) gelagar segmental bentuk I dengan lantai komposit dibuat ganjil agar letak sambungan tidak berdekatan dengan titik kritis momen ($1/2 L$) dan geser ($1/4 L$)
2. Prategang penuh lebih aman digunakan mengingat prinsip tegangan tarik nol dalam keadaan daya layan di semua potongan kritis maupun tidak kritis. Jumlah tendon dan mutu beton akan mengalami kenaikan berarti, tetapi keamanan struktural terpenuhi.
3. Tendon yang ditarik secara eksentris dibatasi dengan meletakkan maksimum dua tendon dalam satu baris, dengan demikian lendutan gelagar ke arah samping diminimal-kan dalam proses penegangan tendon

Daftar Pustaka

1. Laporan Penelitian Beton Mutu Tinggi untuk Jaringan Prasarana Jalan Wilayah – Lanneke Trisanto, 2002
2. Laporan Penelitian Pengembangan Gelagar Pracetak Segmental Beton Mutu Tinggi – Lanneke Trisanto, 2005
3. Study Report "Survey and Design of Simple Span Precast Concrete Girders made Continuous" – C.C. Fu, T. Kusdi, The Bridge Engineering Software and Technology (Best) Centre – Department of Civil and Environmental Engineering – University of Maryland – 2000
4. Seismic Performance of Precast Segmental Bridge Superstructures – The University of California – Report no. SSRP – 2001/24 – Sami Hanna Megally, Manu Garg, Frieder Seible, Robert K. Dowell
5. Finite Element Analysis of Externally Prestressed Segmental Bridges – G. Rombach, A. Specker – Department of Concrete Structures – Technical University of Hamburg - Germany
6. Creep dan Shrinkage Effects in Segmental Bridges – Lionel Bellevue P.E. , Paul J. Towell P.E., Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.
7. External Prestressing, Bavarian Examples – Konrad Zilch, Richard Buba
8. Balanced Cantilever Segmental Bridge System Test – Kelly Burnell, Jose Restrepo, Frieder Seible – University of California – San Diego
9. Precast Bridge Deck Design Systems – Mrinmay Biswas – Research Center Duke University – Durham – North Carolina – PCI Journal March-April 1986
10. Precast Segmental Construction With External Tendons and Dry joints – R.L. Taylor, Acer Consultants Ltd, United Kingdom
11. Prestressed Concrete Bridges – Indonesian Australian Concrete Bridge Project – Construction Drawings and Details

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. GELAGAR I KOMPOSIT BENTANG TUNGGAL (prototipe bentang 22,6m)

A1. Perhitungan gelagar segmental

Besaran penampang gelagar I ($h = 900\text{mm}$) :

$A = 257250 \text{ mm}^2$, $I_x = 0,2267 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$, $y = 363,24\text{mm}$, $y' = 536,75$, $W_b = 62410527\text{mm}^3$, $W_a = 42235677 \text{ mm}^3$. Dengan pengurangan lubang tendon $W_b = 65863331 \text{ mm}^3$ dan $W_a = 36890871 \text{ mm}^3$

Rasio b efektif = $(E \text{ beton } f'c'30)/(E \text{ beton } f'c'65) = (47000/\sqrt{f'c'})/(0,0431 \times 2400^{1,5} \times 65^{0,5}) \sim 0,7$ sehingga lebar b efektif menjadi $0,70 \times 1850\text{mm} = 1300 \text{ mm}$. Besaran gelagar komposit : $A = 407750 \text{ mm}^2$, $I_x = 0,6315 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$, $y = 471\text{mm}$, $y' = 604\text{mm}$, $W_a = 213344594\text{mm}^3$, $W_b = 104552980\text{mm}^3$, $W_{top} = 134076433\text{mm}^3$

CGS tendon diperhitungkan di tengah bentang berdasarkan ordinat tepi bawah sheat tendon (3 tendon berdampingan dengan ordinat 52mm dan satu tendon tengah dengan ordinat 137mm terhadap tepi bawah gelagar) dengan diameter sheat (diameter luar) 54mm : cgs 100,25mm.

Satu strand diameter $\frac{1}{2}" = 12,5 \text{ mm}$ dengan luas $98,7\text{mm}^2$, jadi 7 strand dalam satu tendon : $7 \times 98,7\text{mm}^2 = 691 \text{ mm}^2$. Prategang initial $150 \text{ kN} = 15 \text{ ton/strand} = 80\% \text{ ultimit } (80\% \times 18,4\text{ton})$ dikurangi kehilangan jangka pendek menjadi $70\% \text{ ultimit}$, dikurangi kehilangan jangka panjang menjadi $60\% \text{ ultimit}$ (kehilangan $\sim 15\%$ untuk prategang tak terhingga). Sehingga 4 tendon mempunyai gaya prategang : $4 \times 7 \times 15 \text{ ton} = 4200 \text{ kN}$ ($80\% \text{ ultimit}$), 3675 kN ($70\% \text{ ultimit}$ untuk keadaan awal prategang dengan berat sendiri gelagar), 3150 kN ($60\% \text{ ultimit}$ untuk keadaan akhir komposit balok dengan beban mati dan hidup total yang disuperposisi menurut urutan pelaksanaan gelagar menjadi komposit dengan lantai).

Keadaan awal prategang :

$70\% \text{ gaya } 4 \text{ tendon pasca penegangan} = 3675 \text{ kN}$

Momen lawan prategang : $P_x e = 3675 \text{ kN} \times (327,8 - 100,25)\text{mm} = 836246000 \text{ Nmm}$.

Tegangan serat atas dan bawah gelagar akibat prategang :

$$\sigma_{ap} = \{(3675) \times 1000\} / 257250 - 836246000 / 36890871 = -8,383 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bp} = \{(3675) \times 1000\} / 257250 + 836246000 / 65863331 = 26,98 \text{ MPa}$$

Tegangan akibat prategang setelah kehilangan jangka panjang $\sim 60\% \text{ ultimit}$:

$$\sigma_{ap} = -7,185 \text{ MPa}, \sigma_{bp} = 23,12 \text{ MPa}$$

Tegangan akibat beban yang bekerja : dalam MPa

Tepi serat	Berat sendiri	Lantai	diafragma	Aspal & beban hidup	Total
Top = lantai komposit				$9,13 < 0,4(30)$	9,13
Atas = gelagar	10,31	12,97	1,89	5,74	30,91
Bawah = gelagar	-5,91	-7,43	-1,08	-11,71	-26,13

Tegangan diperhitungkan berdasarkan momen maksimum berikut :

- Berat sendiri gelagar I : $0,2572 \times 25 \text{ kN/m}^3 = 6,43 \text{ kN/m}$

Momen maksimum berat sendiri = $1/8 \cdot 6,43 \cdot (22)^2 = 389,015 \text{ kNm}$

- Berat lantai dipikul oleh gelagar I : $0,175 \times 1,85 \times 25 \text{ kN/m} = 8,093 \text{ kN/m}$

Momen akibat lantai = $1/8 \cdot 8,093 \cdot (22)^2 = 489,62 \text{ kNm}$

- Berat diafragma dipikul oleh gelagar I : tebal 0,2m x tinggi 0,775m x lebar 1,68m x $25 \text{ kN/m}^3 = 6,5 \text{ kN}$ - jumlah diafragma sesuai rencana aktual

Momen akibat diafragma = $9,75 (11) - 6,5 (5,5) = 71,5 \text{ kNm}$

- Berat aspal : $0,06 \times 1,85 \times 22 \text{ kN/m}^3 = 2,442 \text{ kN/m}$

Momen akibat aspal : $1/8 \cdot 2,442 (22)^2 = 147,74 \text{ kNm}$

- Beban hidup : $1,85 \times 90 \text{ kN/m} = 16,65 \text{ kN/m}$ beban merata
 $1,85 \times 49 \text{ kN} \times 1,4$ (koefisien kejut) = $12,7 \text{ kN}$ beban terpusat

Momen akibat beban hidup : $1/8 \cdot 16,65 \cdot 22^2 + 1/4 \cdot 12,7 \times 22 = 1077,175 \text{ kNm}$

Momen akibat aspal dan beban hidup = $1224,915 \text{ kNm}$ dipikul oleh T komposit

Tegangan pada awal prategang akibat prategang (70% ultimit) dengan berat sendiri gelagar yang bekerja :

Serat atas gelagar : $-8,38 + 10,31 = 1,87 \text{ MPa}$ tekan

Serat bawah gelagar : $26,98 - 5,91 = 21,07 \text{ MPa} \sim 0,5 (40)$ saat transfer beton 40 MPa min.

Pada beban total dan prategang tak terhingga (60% ultimit): tegangan total adalah

Serat atas gelagar : $-7,185 + 30,91 = 23,725 \text{ MPa} < 0,4 (65) = 26 \text{ MPa}$

Serat bawah gelagar : $23,12 - 26,13 = -3,01 \text{ MPa}$ tarik diatasi dengan tulangan biasa 4 diam 12mm dalam perhitungan parsial prategang secara ultimit.

Momen ultimit :

M berat sendiri x 1,2 (pracetak) = $389,015 \times 1,2 = 466,818 \text{ kNm}$

M lantai x 1,3 (cor di tempat) = $489,62 \times 1,3 = 636,506 \text{ kNm}$

M diafragma x 1,3 (cor di tempat) = $71,5 \times 1,3 = 92,95 \text{ kNm}$

M aspal x 1,3 = $147,741 \times 1,3 = 192,063 \text{ kNm}$

M beban hidup x 2 = $957,55 \times 2 = 1915,1 \text{ kNm}$

Momen ultimit diperlukan adalah $3303,437 \text{ kNm}$

Momen ultimit gelagar dihitung sebagai berikut :

Dengan tendon tegangan ultimit 18600 kg/cm^2 , gaya ultimit total $5320,8 \text{ kN}$ yang berasal dari :

4 tendon = $4 \times 7 \times 98,7 \times 18600 \text{ kg/cm}^2 = 5140 \text{ kN}$

tulangan 4 diam 12mm = $4 \times 1,13 \text{ cm}^2 \times 4000 \text{ kg/cm}^2 = 180,8 \text{ kN}$

Gaya tarik total = $5320,8 \text{ kN}$

Dengan gelagar aktual dimana lantai mutu beton 30 MPa dan lebar flens 185 cm diperoleh tinggi bidang tekan :

$5320800 / (0,85 \times 30 \times 1850) = 112,7 \text{ mm} \sim 175 - 70 \sim 105 \text{ mm}$ (tebal lantai diatas pelat acuan)

tendon saja : $5140000 / (0,85 \times 30 \times 1850) = 109 \text{ mm} \sim 105 \text{ mm}$

Momen lawan dari tulangan prategang dan tulangan praktis baja biasa menjadi :

$\Sigma T \times z = 5140 (0,85) + 180,8 (0,914) = 4534 \text{ kNm}$

Momen lawan dari tendon saja : $5140(0,85) = 4369\text{kNm}$

Menurut persyaratan BMS : 75% momen ultimit teoritis dianggap sebagai momen ultimit rencana = $75\% \times 4534\text{ kNm} = 3400\text{ kNm} > 3303,437\text{ kNm}$ yang diperlukan

Dengan 80% momen ultimate teoritis $4369\text{kNm} = 3495\text{kNm} > 3303,437$ yang diperlukan dalam gelagar aktual.

Berdasarkan perhitungan teoritis gelagar hasil modifikasi telah memenuhi persyaratan teknis dan dapat langsung diterapkan di lapangan. Mengingat dalam studi ini direncanakan untuk model skala penuh maka diadakan pembebanan percobaan sampai mendekati momen ultimit rencana.

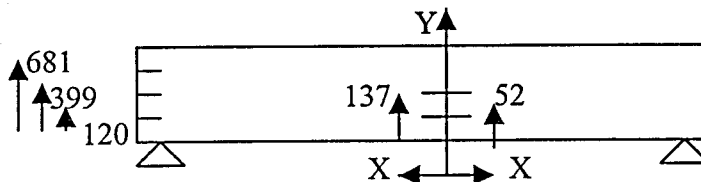
Catatan :

1. Model gelagar monolitik telah dipertimbangkan mempunyai tinggi bidang tekan sama dengan dengan 30 MPa menjadi lebar flens 85 cm dengan 65 MPa mengingat model dibuat dengan mutu beton 65 MPa, jadi lebar flens $30/65 \times 185\text{ cm} = 85\text{ cm}$.
2. Pelaksanaan model gelagar segmental juga dengan lebar flens 85cm, dan dilaksanakan dengan 75 MPa untuk gelagar dan 80 MPa untuk lantai. Dengan demikian model gelagar segmental akan lebih kuat dari gelagar monolitik, karena tinggi bidang tekan lebih kecil dan lengan momen dalam lebih besar dari model gelagar monolitik.

Besaran penampang komposit gelagar model untuk evaluasi uji beban agak berbeda walaupun berdekatan dengan besaran penampang komposit aktual :

lebar b efektif = 850 mm, $A = 406000\text{ mm}^2$, $I_x = 0,5978 \cdot 10^{11}\text{ mm}^4$, $y = 483\text{mm}$, $y' = 592\text{mm}$, $W_a = 194091000\text{mm}^3$, $W_b = 100979700\text{mm}^3$, $W_{top} = 123757860\text{ mm}^3$

Trase tendon (tepi bawah selubung tendon) dihitung dengan persamaan parabol sebagai berikut :



Tendon 1&2 : $l = 2200\text{ cm}$, Y tengah bentang 5,2 cm, Y ujung bentang 12 cm, sumbu X berawal di tengah bentang, persamaan ordinat $Y_1 = 5,62 \times 10^{-6} X^2 + 5,2\text{ cm}$

Tendon 3 : $l = 2200\text{ cm}$, Y tengah bentang 5,2 cm, Y ujung bentang 39,9 cm, sumbu X berawal di tengah bentang, persamaan ordinat $Y_2 = 2,867 \times 10^{-5} X^2 + 5,2\text{ cm}$

Tendon 4 : $l = 2200\text{ cm}$, Y tengah bentang 5,2 cm, Y ujung bentang 12 cm, sumbu X berawal di tengah bentang, persamaan ordinat $Y_3 = 4,495 \times 10^{-5} X^2 + 13,7\text{ cm}$

Ordinat y tendon (tepi bawah selubung) ditabelkan sebagai berikut :

Absis mm	X	Ordinat Y, Z tendon 1&2	Ordinat , Z tendon 3	Ordinat Y, Z tendon 4
0		52 ; 100 & -100	52 ; 0	137 ; 0
1000		53 ; 100 & -100	55 ; 0	141 ; 0
2000		54 ; 100 & -100	63 ; 0	155 ; 0
3000		57 ; 100 & -100	78 ; 0	177 ; 0
4000		61 ; 100 & -100	98 ; 0	209 ; 0
5000		66 ; 100 & -100	124 ; 0	249 ; 0
6000		72 ; 100 & -100	155 ; 0	299 ; 0
7000		80 ; 100 & -100	192 ; 0	357 ; 0
8000		88 ; 100 & -100	235 ; 0	425 ; 0
9000		98 ; 100 & -100	284 ; 0	501 ; 0
10000		108 ; 100 & -100	339 ; 0	587 ; 0
11000		120 ; 100 & -100	399 ; 0	681 ; 0

Penulangan geser dibuat dengan jarak dan diameter sengkang sesuai bentang 19m dan diperiksa kekuatannya sebagai berikut :

Gaya lintang tumpuan : 377 kN, Gaya lintang di $\frac{1}{4}L$ = 199 kN dari program komputer

Di $\frac{1}{4}L$ terjadi anti gaya lintang ($=dy/dx$) akibat lengkungan tendon dimana $X = 550\text{cm}$ terhadap tengah bentang :

$$[2 \times 5,62 \cdot 10^{-6} (2X) + 2,867 \cdot 10^{-5} (2X) + 4,495 \cdot 10^{-5} (2X)] F_{\infty} \text{ tendon} = (0,0122 + 0,031 + 0,049) 0,85 \times 1050 \text{ kN} = 82,29 \text{ kN}$$

Sehingga sisa gaya lintang = $199 - 82,29 = 116,7 \text{ kN}$ (SLS)

CGS tendon di $\frac{1}{4}L$: 164,25 mm mengingat ordinat tepi bawah selubung 69mm, 69mm, 139,5mm, 274mm terhadap tepi bawah gelagar berarti titik berat tendon 96mm, 96mm, 166mm, 299mm terhadap tepi bawah gelagar ($1/2$ selubung berdiameter 54mm = 27mm).

Gaya geser diperhitungkan dalam ULS sebagai berikut :

Faktor beban mati 1,3 dan faktor beban hidup 2 sehingga gaya lintang $\frac{1}{4}L$ ultimit menjadi $99,208 (1,3) + 100(2) = 328,97 \text{ kN}$ akibat pembebanan dan berat sendiri gelagar

Untuk keamanan diperhitungkan anti gaya lintang 82,29 kN sehingga sisa gaya lintang menjadi : 246,68 kN (ULS)

Geser maksimum gelagar I beton : $V = 0,06 f'_c b' j d = 0,06 (65) (170) (\sim 0,95) (723,8) = 455,8 \text{ kN}$ tidak terlampaui

$$V_{\text{ijin}} = 0,06 \times 21,2 \times 170 \times 0,95 \times 723,8 \text{ kN} = 148 \text{ kN}$$

$$(d = 900 - \text{cgs } 176,2 = 723,8 \text{ mm})$$

$$\text{Sisa gaya lintang ULS} = 246,68 - 148 = 98,68 \text{ kN}$$

Tulangan sengkang diam. 12mm jarak 40 cm yang ada = 113 mm^2 memenuhi keperluan

$$\text{tulangan sengkang : } A_v = \frac{(V_u - V_c)s}{2f_{sy}jd} = \frac{98,68 \times 400}{2 \times 400 \times 0,95 \times 723,8} = 71,8 \text{ mm}^2 / 400 \text{ mm}$$

Penghubung geser dibuat dengan jarak sesuai bentang tipe 19m dan diperiksa kekuatannya sebagai berikut :

Gaya geser yang dipikul oleh gesekan komposit di flens atas gelagar akibat aspal beban hidup dan sandaran : $= 60,5 \text{ kN/m}$ beban mati ($5,5 \text{ kN} \times 11$) dan $174,1 \text{ kN}$ beban hidup ($14,8 \times 11 + 11,3$) sehingga gaya geser ultimit = $1,3(60,5) + 2(174,1) = 426,85 \text{ kN}$

$$v = \frac{V_u Q}{I_e t'} = \frac{426850 \times 51412725}{0,6315 \times 10^{11} \times 350} = 0,99 \text{ MPa ultimit}$$

Dalam SLS : v akibat $(60,5+174)$ kN diperhitungkan = 0,54 MPa yang masih dapat dipikul oleh perkasaran bidang kontak beton gelagar

Kekuatan penghubung geser yang ada (dalam SLS) diam 12mm jarak 40 cm :

$$\tau = (2,26 \times 1400) / (17 \times 40) = 0,465 \text{ MPa}$$

jadi tegangan geser yang dipikul oleh bidang kontak hanya $0,54 - 0,46 = 0,08 \text{ MPa}$,

sehingga penghubung geser bentang 19m memenuhi untuk keperluan bentang 22m.

Q statis momen lantai terhadap tepi atas gelagar sesuai penampang komposit rencana : $Q = 1300 \times 105 \times -0,9 \times (471 - 52,5) = 51412725 \text{ mm}^3$

Lendutan yang terjadi akibat prategang, beban mati dan beban hidup :

$$\text{Gelagar : } \Delta g = (5/384) w l^4 / EI = (5/384) (14,523 \times 22000^4) / (36000 \times 0,2267 \cdot 10^{11}) = 5,4 \text{ cm}$$

Berat lantai 8,093 kN/m + gelagar 6,43 kN/m = 14,523 kN/m dipikul oleh gelagar

Sedangkan berat aspal dan sandaran 5,5 kN/m dipikul oleh penampang komposit :

$$\Delta \text{ komp} = (5/384) w l^4 / EI = (5/384) (5,5 \times 22000^4) / (36000 \times 0,6315 \cdot 10^{11}) = 0,74 \text{ cm}$$

$$\Delta \text{ diafr} = (13000 \times 22000^3) / (56,3 \times 36000 \times 0,2267 \cdot 10^{11}) = 0,3 \text{ cm}$$

Berat diafragma = $2 \times 6,5 = 13 \text{ kN}$ (hanya pada 1/3 l)

Jadi : lendutan beban mati : $5,4 + 0,74 + 0,3 = 6,44 \text{ cm}$

Lendutan beban hidup :

$$(5/384) \times (16,65 \times 22000^4) / (36000 \times 0,6315 \cdot 10^{11}) + 1/48 (12712,5 \times 22000^3) / (36000 \times 0,6315 \times 10^{11}) = 2,25 \text{ cm}$$

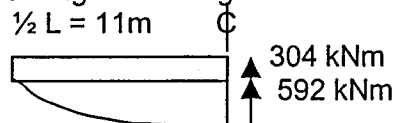
Lawan lendutan akibat prategangan :

Di tengah bentang : $M = 895900 \text{ kNm}$ akibat 4 tendon

Di tumpuan : $M = 4200 \times 0,0725 \text{ m} = 304,5 \text{ kNm}$ akibat 4 tendon

Tumpuan : $2 (150) + 1 (440) + 1 (730) = 4 \text{ y cgs}$ sehingga $y \text{ cgs} = 367,5 \text{ mm}$ dan $e = 440 - 367,5 = 72,5 \text{ mm}$

Momen parabolik pada tengah bentang : $896 - 304 = 592 \text{ kNm}$



Bidang momen dianggap beban untuk memperoleh nilai lendutan :

$$M = 304 \times 11 \times 5,5 + 592 \times 2/3 \times 11 \times 6,87 = 49048,77 \text{ kNm}^3$$

$$\text{Lawan lendut } M/EI = 48366 / (36000 \times 0,2159 \cdot 10^{11}) = 6,22 \text{ cm (75\% ult)}, 6,63 \text{ cm (80\% ult)}$$

Berat mati gelagar memberi lendutan 2,4cm, lawan lendutan netto setelah penegangan tendon : 3,8cm untuk penegangan 75 % ult dan 4,2cm untuk 80% ult, ternyata sesuai pengukuran aktual dari lawan lendutan sebesar 4,03 cm setelah penegangan tendon selesai.

Lendutan akibat berat sendiri 6,44 cm + lendutan akibat beban hidup 2,25 cm = 8,69 cm jadi lendutan akhir $8,69 - 6,22 = 2,47 \text{ cm} \sim 1/1000 \text{ L}$ (memenuhi persyaratan $1/1000 \text{ L}$ untuk struktur beton).

A.2 Rencana percobaan pembebanan gelagar segmental di pabrik komponen jembatan beton pracetak Buntu

Pembebanan gelagar komposit direncanakan berdasarkan penampang model dengan lebar lantai $b = 850 \text{ mm}$, $A = 406000 \text{ mm}^2$, $I_x = 0,5978 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$, $y = 483 \text{ mm}$, $y' = 592 \text{ mm}$, $W_a = 194091000 \text{ mm}^3$, $W_b = 100979700 \text{ mm}^3$, $W_{top} = 123757860 \text{ mm}^3$

Berdasarkan penampang gelagar diperoleh tegangan sebagai berikut dalam batas daya layan SLS :

Tegangan akibat beban rencana yang bekerja pada penampang model : dalam MPa

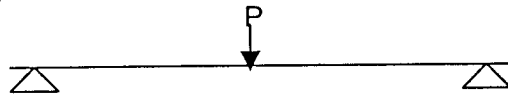
Tepi serat	Berat sendiri $M = 389 \text{ kNm}$	Lantai 225 kNm $(489 \text{ kNm})^*$	Diafrag- ma $(71,5 \text{ kNm})^*$	Aspal & beban hidup $M = 1105 \text{ kNm}$	Total
Top = lantai komposit Atas = gelagar Bawah = gelagar	10,31 -5,91	6,3 (12,97)* -3,6 (7,43)	(1,9)* (-1,1)	$8,9 < 0,4(30)$ $5,7 \sim (5,18)^*$ $-10,9 \sim (-10,6)$	8,9 22,3 -20,5

- * = momen dan tegangan sebenarnya untuk lantai dengan flens 185 cm (lebar efektif 130 cm untuk 65 MPa)
- tegangan rencana sebenarnya top $9,13 \sim 8,9 \text{ MPa}$, serat atas gelagar $30,91 \text{ MPa}$, serat bawah gelagar $-26,13 \text{ MPa}$

Dalam percobaan pembebanan, momen rencana keadaan sebenarnya disimulasikan sebagai berikut :

Tegangan yang telah ada akibat berat sendiri gelagar dan lantai 85 cm : $10,31 + 6,3 = 16,61 \text{ MPa}$ di serat atas gelagar, $-5,91 - 3,6 = -9,51 \text{ MPa}$ di serat bawah gelagar

Beban rencana merupakan beban terpusat di tengah bentang $22,6 \text{ m}$: **P rencana 30,5 Ton**



Sebagai patokan diambil serat bawah gelagar yang harus dibuat sama dengan tegangan rencana sebenarnya :

Pada serat bawah perlu tambahan tegangan $-26,13 + 9,51 \text{ MPa} = -16,62 \text{ MPa}$ yang ekuivalen beban terpusat pada tengah bentang penampang komposit gelagar model sehingga momen yang diperlukan $16,62 \times 100979700 = 1678282614 \text{ Nmm}$ ($= 1/4 \text{ PI}$) sesuai beban terpusat $P = 305,1 \text{ kN} = 30,5 \text{ tonforce}$, tegangan serat atas menjadi $16,61 + 8,65 = 25,26 \text{ MPa} < 26 \text{ MPa}$, tegangan lantai atas top menjadi $13,56 \text{ MPa} < 0,4 \times 65 = 26 \text{ MPa}$, berarti semua tegangan dalam batas daya layan SLS.

Beban ultimit rencana diperhitungkan sebagai berikut :

Beban yang ada dari gelagar dan lantai 85 cm dihitung SLS (faktor beban $= 1$) yang menghasilkan momen $389 + 225 \text{ kNm} = 614 \text{ kNm}$, sedangkan momen ultimit yang diperlukan $3303,437 \text{ kNm}$ jadi harus ada tambahan momen $2689,44 \text{ kNm}$ yang dihasilkan oleh beban terpusat 489 kN atau $48,9 \text{ tonforce}$, tegangan serat atas menjadi ultimit $0,85 \times 75 \text{ MPa} = 64 \text{ MPa}$ (blok tegangan ultimit) dan tulangan prategang dan non prategang mendekati batas leleh.

Beban ultimit runtuh diperhitungkan sebagai berikut :

Kekuatan gelagar model harus mewakili **ultimit runtuh teoritis** ($K^R = 1$) dari rencana gelagar aktual : 4534 kNm sedangkan M yang ada 614 kNm , jadi untuk runtuh diperlukan tambahan momen $4534 - 614 = 3920 \text{ kNm}$ yang ekuivalen beban terpusat **71,3 tonforce**.

LAMPIRAN B : GELAGAR I KOMPOSIT DIBUAT GELAGAR MENERUS

Perhitungan diafragma tipikal untuk bentang menerus kelipatan 22,6m

Diafragma memikul momen negatif sebesar momen positif bentang tunggal akibat lapis perkerasan dan beban hidup sebesar 1224,9 kNm per gelagar dengan lebar flens 185 cm. Tinggi diafragma sama dengan gelagar komposit termasuk lantai : $90 + 17,5 = 107,7$ cm. Jumlah tulangan tambahan di lantai : $122490 \text{ kgm} / (98,75 \times 19,9) = 62,33 \text{ cm}^2$ yang dibagi dalam dua lapis, $31,2 \text{ cm}^2$ per lapis = 9 tulangan diam. 22mm = tulangan diam 22mm – jarak antara 20 cm, mutu baja tulangan 390 MPa (leleh). Tulangan momen positif diperhitungkan terhadap penampang persegi dengan ukuran 65 cm (flens bawah gelagar) x 107,5 cm, dengan momen penahan $1/6 bh^2 = 125192 \text{ cm}^3$, dimana $1,2 M_{cr} = 1,2 \times 125192 \times 0,75 \sqrt{f'_c} = 1,2 \times 125192 \times 0,75 \sqrt{65} = 90,13 \text{ tm} = 90000 \text{ kgm}$ yang dikurangi oleh momen lapis perkerasan 14770 kgm menjadi 75230 kgm, yang memerlukan tulangan $75230 / (100 \times 19,9) = 37,8 \text{ cm}^2$ atau 8 batang dengan diameter 25mm (mutu baja 390 Mpa) pada flens bawah. Tulangan momen positif dapat memanfaatkan strand yang tidak di-prategang : $75230 / (100 \times 82) = 9,17 \text{ cm}^2 = 10$ strand diam. 12,5mm (leleh $0,9 \times 1800 = 1620 \text{ MPa}$, luas $0,987 \text{ cm}^2$).

LAMPIRAN C : STANDAR GELAGAR SEGMENTAL DENGAN BETON MUTU TINGGI (PERENCANAAN PRATEGANG PENUH)

Bahan beton

- | | | | |
|---------------------------------|---|---|------------------------|
| • Mutu beton f'_c : | gelagar 65 MPa | & | pelat lantai 30 MPa |
| • Modulus elastisitas E beton : | gelagar 37000 MPa | & | pelat lantai 25000 MPa |
| • Berat isi beton : | 25 kN/m ³ | | |
| • Keadaan penarikan tendon : | mutu beton $f'_{ci} = 0,95 f'_c$
tegangan tekan = $0,55 f'_{ci}$
tegangan tarik = 0 | | |
| Keadaan akhir : | mutu beton f'_c
tegangan tekan $0,4 f'_c$
tegangan tarik = 0 | | |

Bahan baja tulangan

- BJTP : 24 (tegangan leleh 240 MPa) untuk tulangan sekunder pembagi/praktis
- BJTD : 39 (tegangan leleh 390 MPa) untuk tulangan utama momen dan geser
- Modulus elastisitas E baja : 200000 MPa

Bahan strand prategang

Diameter nominal 12,5mm
Luas penampang 98,7 mm²
Modulus elastisitas 197000 MPa
Beban putus 18,7 tonf

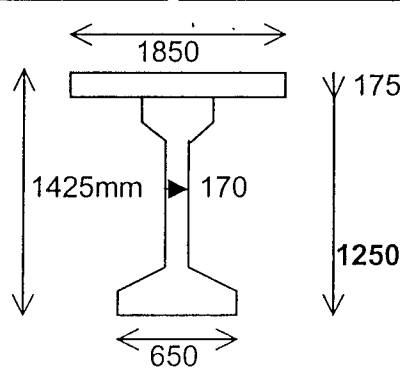
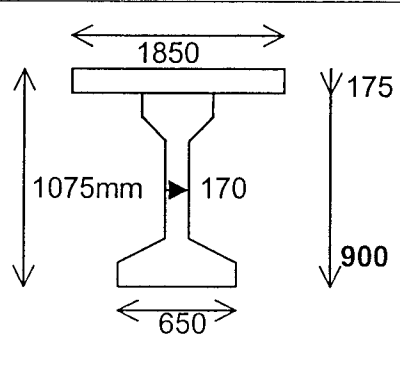
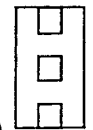
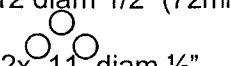
Peraturan Perencanaan

Standar Pembebanan untuk Jembatan
Standar Perencanaan Beton Struktural untuk Jembatan
Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan

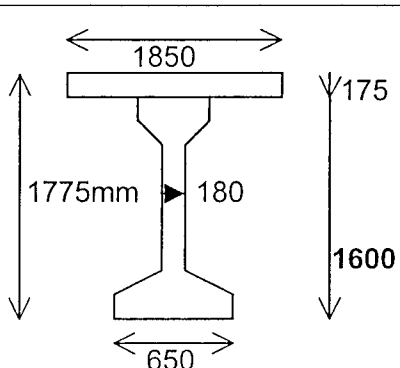
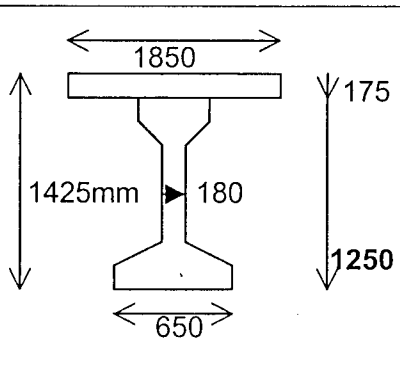
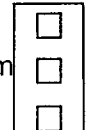
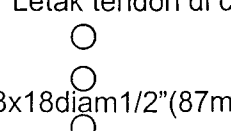
Pembagian segmen

Jumlah segmen per gelagar dibuat ganjil

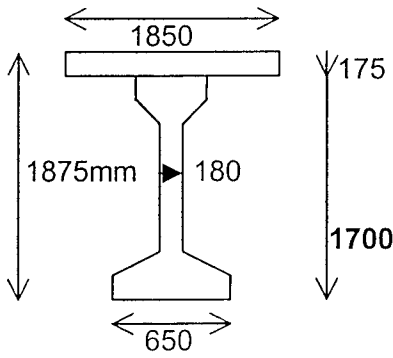
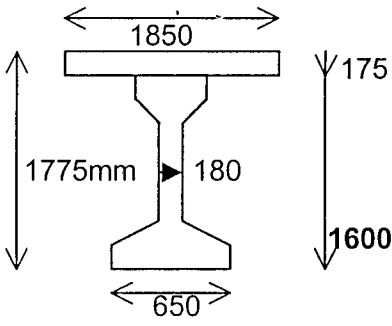
Standar bentang 22,6m

Fc' 40 MPa Standar lama	Fc' 65 MPa Standar usulan	fc' 65 MPa vol. beton gelagar & jumlah tendon
 tendon : 3 tendon x 7 strand +1x4 volume beton : 7,51m³	 tendon : 34 strand diam ½" cgs : 124mm thd tepi bawah volume beton : 5,75m³ tulangan diafragma : M negatif lantai = 2 lapis @ diam 22mm- jarak 20cm, tulangan M positif flens bawah =8 @ diam 25mm	Beton : - 1,76m³ (berkurang 23%) Tendon : +9 strand (bertambah 36%) Blok angkur: 350x900mm (3 angkur @ 230/285mm)  susunan 3 tendon : 2 tendonx11+1x12 Letak tendon di cl: 12 diam ½" (72mm) 

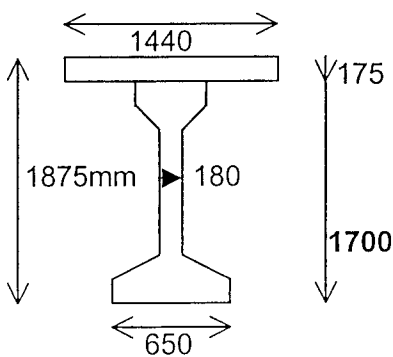
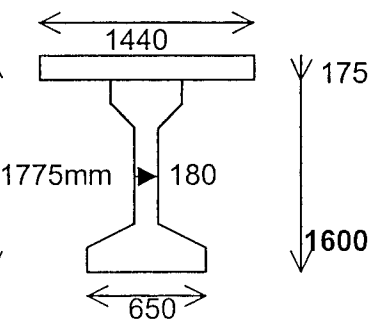
Standar Bentang 31,6m

Fc' 40 MPa Standar lama	Fc' 65 MPa Standar usulan	fc' 65 MPa vol. beton gelagar & jumlah tendon
 tendon : 6 tendon x 7 strand volume beton : 16,42 m³	 tendon : 54 strand cgs : 212,5mm thd tepi bawah volume beton : 13,09 m³ tulangan diafragma : M negatif lantai = 2 lapis @ diam 22mm- jarak 15cm, tulangan M positif flens bawah=10 @ diam 25mm	Beton : - 3,33m³ (berkurang 20%) Tendon : +12 strand (bertambah 28,5%) Blok angkur: 550x1250mm (3 angkur @ 290/365mm)  Susunan 3 tendon : 3 x18 strand Letak tendon di cl: 3x18diam½"(87mm) 

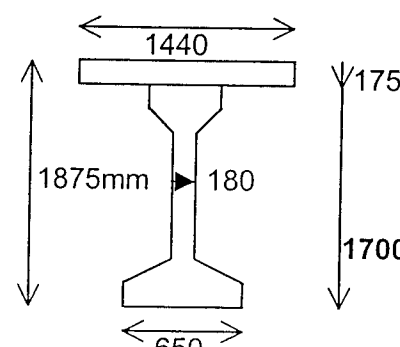
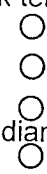
Standar Bentang 35,6m

Fc' 40 MPa Standar lama	Fc' 65 MPa Standar usulan	fc' 65 MPa vol. beton gelagar & jumlah tendon
 tendon : 6 tendon x 7 strand+1x5 volume beton : 22,5 m³	 tendon : 3x19=57 strand cgs : 212,5mm thd tepi bawah volume beton : 18,5 m³ tulangan diafragma : M negatif lantai = 2 lapis @ diam 22mm- jarak 15cm, tulangan M positif flens bawah=13 @ diam 25mm	Beton : - 4 m³ (berkurang 18%) Tendon : +10 strand (bertambah 21%) Blok angkur: 550x1600mm (3 angkur @ 290/365mm)  Susunan 3 tendon : 3 x19 strand Letak tendon di cl:  3x19diam1/2"(87mm)

Standar Bentang 40m

Fc' 40 MPa Standar lama	Fc' 65 MPa Standar usulan	fc' 65 MPa vol. beton gelagar & jumlah tendon
 tendon : 2 x19strand+2x12 volume beton : 24,47 m³	 tendon : 3x22 =66 strand cgs : 220mm thd tepi bawah volume beton : 21,1 m³ tulangan diafragma : M negatif lantai = 2 lapis @ diam 22mm- jarak 13cm, tulangan M positif flens bawah=13 @ diam 25mm	Beton : - 3,4 m³ (berkurang 14%) Tendon : +4 strand (bertambah 6,5%) Blok angkur: 550x1600mm (3 angkur @ 315/395mm)  Susunan 3 tendon : 3 x22 strand Letak tendon di cl:  3x22diam1/2"(92mm)

Standar Bentang 45m

Fc' 75 MPa Standar usulan  tendon: 4x19diam 1/2"=76 strand cgs : 271mm thd tepi bawah volume beton : 30,58 m³	tulangan diafragma : M negatif lantai = 2 lapis @ diam 22mm-jarak 11cm, tulangan M positif flens bawah=13 @ diam 25mm Blok angkur:  550x1700mm (4 angkur @ 290/365mm) Susunan 4 tendon : 4 x19 strand Letak tendon di cl:  4x19diam1/2"(87mm)
--	---

KO: 163

624.270

TI