

BAB VI

STRUKTUR BETON PRATEKAN

6.1 Beton Pratekan

Beton pratekan merupakan struktur komposit dari material beton dan baja dengan mutu tinggi. Baja yang digunakan disebut tendon, yaitu beberapa baja yang dikelompokkan dan membentuk kabel. Pratekan adalah metode pemberian tegangan awal pada struktur sebelum menerima beban luar, dengan ukuran dan distribusi tertentu, sehingga tegangan akibat beban luar dapat dikompensasi hingga mencapai tingkat yang diinginkan (Mark et al., 2018). Prinsip kerja dari beton pratekan yaitu tendon ditegangkan diawal dengan cara ditarik untuk memberikan tegangan tekan pada penampang beton sebelum adanya beban yang bekerja pada struktur. Besarnya gaya tarik yang diberikan pada tendon untuk mendapatkan gaya pratekan yang cukup harus disesuaikan dengan beban batas sedemikian rupa sehingga penampang beton tidak mengalami tegangan tarik saat beban bekerja. Penegangan kabel dan faktor lainnya menimbulkan kehilangan gaya pratekan pada beton pratekan. Pengertian beton pratekan menurut beberapa peraturan adalah sebagai berikut:

1. Menurut PB1 – 1971

Beton pratekan adalah beton bertulang dimana telah ditimbulkan tegangan-tegangan internal dengan nilai dan pembagian yang sedemikian rupa hingga tegangan-tegangan akibat beton-beton dapat dinetralkan sampai suatu taraf yang diinginkan.

2. Menurut Draft Konsesus Pedoman Beton 1998

Beton pratekan adalah beton bertulang yang dimana telah diberikan tegangan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat pemberian beban yang bekerja.

3. Menurut ACI

Beton pratekan adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal.

Berikut lokasi Jembatan Sungai Lengsep STA 43+425 yang ditunjukkan oleh gambar 6.1 berikut:



Gambar 6.1 Lokasi Jembatan Sungai Lengsep
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

6.2 Metode Penarikan (*Stressing*)

Stressing girder adalah proses penarikan kabel pratekan (*tendon*) pada balok beton pratekan untuk memberikan gaya tekan pada beton, sehingga mampu menahan beban tarik selama masa layan. Proses ini bertujuan meningkatkan kapasitas struktur dan mengurangi kemungkinan retak pada balok. Secara umum, terdapat dua metode penarikan tendon yang digunakan pada konstruksi beton pratekan, yaitu *Pre-Tension Method* dan *Post-Tension Method*.

6.2.1 *Pre-Tension Method*

Pre-tension method adalah metode di mana penarikan baja pratekan dilakukan sebelum pengecoran beton. Pada metode ini, strand baja ditarik dengan gaya tertentu terhadap tumpuan (*abutment*) yang kuat, kemudian beton dicor di sekeliling tendon yang sudah tegang. Setelah beton mencapai kuat tekan rencana (biasanya 80–100% f'_c), gaya pada baja dilepaskan sehingga tegangan tarik pada tendon berpindah ke beton melalui ikatan (*bond*) antara baja dan beton.

6.2.2 *Post-Tension Method*

Post-tension method adalah metode di mana penarikan baja dilakukan setelah beton mengeras. Dalam metode ini, sebelum pengecoran, ducting (saluran baja atau plastik) dipasang di dalam cetakan untuk tempat tendon. Setelah beton mencapai kekuatan rencana, baja pratekan dimasukkan dan ditarik menggunakan *hydraulic jack*. Gaya pratekan kemudian ditahan oleh angkur pada kedua ujung balok. Setelah proses penegangan selesai, rongga ducting diisi dengan grouting semen untuk melindungi tendon dari korosi.

Karena alasan transportasi dari pabrik beton ke lokasi, maka biasanya beton pratekan dengan sistem post-tension ini dilaksanakan secara segmental (balok dibagi-bagi, misalnya dengan panjang 1 – 1,5 m), kemudian pemberian gaya pratekan dilaksanakan di lokasi pekerjaan, setelah balok segmen-segmen tersebut dirangkai. Pada Jembatan Lengsep STA 43+425 dilakukan *stressing* dengan metode *Post-Tension Method*. Balok girder yang digunakan terdapat 12 buah dengan panjang total masing-masing 25,6 m. Girder dibawa ke lokasi proyek menjadi 5 segmen yang kemudian disatukan dan dilakukan penarikan tendon (*stressing*).

6.2.3 Metode Pelaksanaan *Stressing*

1. Persiapan

Alat-alat yang digunakan dan spesifikasinya

- a. Spesifikasi Jack Hidrolik dan Manometer ditunjukkan pada tabel 6.1 berikut:

Tabel 6.1 Spesifikasi Jack Hidrolik dan Manometer

Kode Tendon	C2,C3,C4	C1
Tipe Hidrolik	YDC2500-B	YDC2500-B
Nomor Jack Hidrolik	C517030B	C517024B
Luas Piston	43690 mm ²	43690 mm ²
Nomor Manometer	1303	1511

Sertifikat Kalibrasi	3-09-24-00857	3-09-24-00858
Tanggal Kalibrasi	2 Desember 2024	2 Desember 2024
Faktor Kalibrasi	43.00857 kN/Mpa	41.27081 kN/Mpa

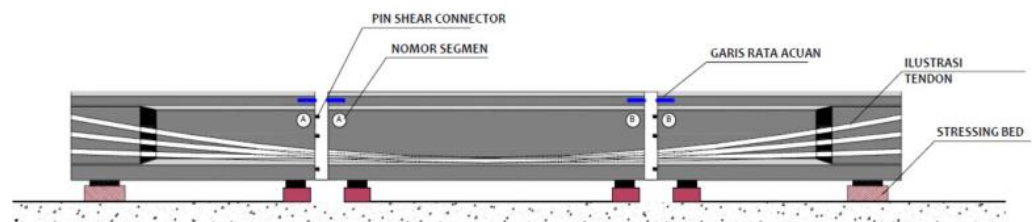
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO

b. Spesifikasi PC Strand Teoritis

Jumlah PC Strand : 7 pcs (C1)
12 pcs (C2,C3,C4)
Diameter PC Strand : 12,7 mm
Luas PC Strand : 98,71 mm²
Kuat Tarik Putus : 1860 N/mm²
UTS : 18944 kgf
Jacking Force : 75% UTS

c. Spesifikasi Material Girder

Panjang = 25,6 m
Tinggi = 1,6 m
CTC = 2,1 m
Jumlah segmen = 5
Mutu beton = 51,7 Mpa
Compressive strength at service = f'c 50 Mpa (minimum)
Compressive strength at stressing = f'c 40 Mpa (minimum)
Diameter aggregate maximum = 19 mm
Persiapan stressing ditunjukkan pada gambar 6.2 berikut

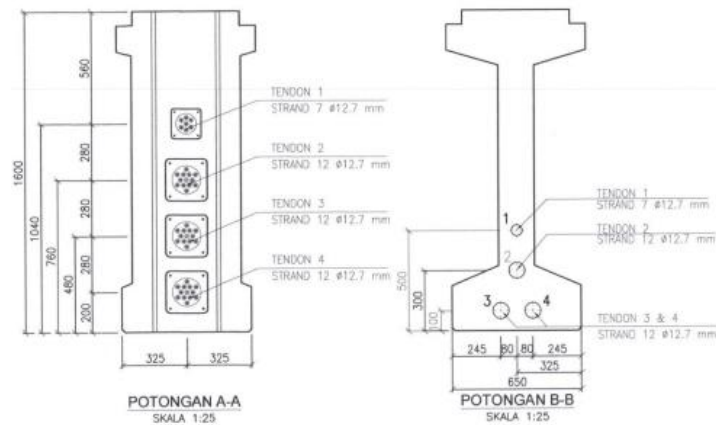


Gambar 6.2 Persiapan Stressing

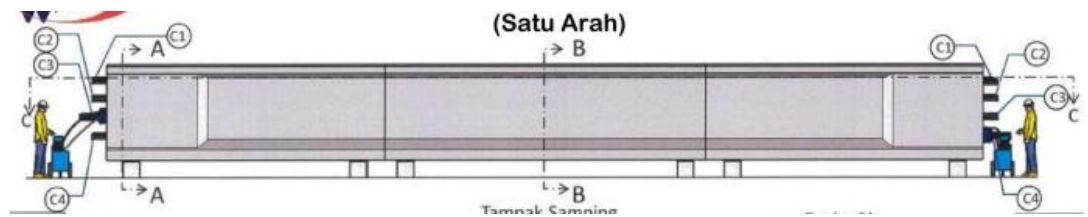
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

2. Pemasangan Strand

Pemasangan strand merupakan tahap awal dalam pekerjaan beton pratekan. Strand berfungsi sebagai elemen baja tarik yang akan diberi gaya pratekan (*stressing*) untuk memberikan gaya tekan awal pada beton. Proses pemasangan strand dilakukan setelah ducting terpasang pada posisi yang sesuai dengan gambar kerja (*shop drawing*) dan telah melalui pemeriksaan kelurusan serta kebersihan. Strand dipotong sesuai dengan panjang layout kabel ditambah ± 1 m untuk stressing length pada angkur. Konfigurasi strand girder ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.3 Konfigurasi strand girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)



Gambar 6.4 Tampak Samping Girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)



Gambar 6.5 Potongan Memanjang Girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Konfigurasi tendon pada girder sangat penting dalam perancangan dan konstruksi elemen beton pra-tekan. Konfigurasi tendon ini penting untuk menentukan distribusi tegangan pada elemen beton dan memastikan kekuatan serta kinerja struktur beton tersebut sesuai dengan kebutuhan desain. Pemasangan strand girder adalah tahap penting dalam pembuatan elemen beton pra-tekan yang kuat dan efisien. Metode ini memungkinkan pembuatan struktur beton yang mampu menahan beban lebih besar, mengurangi risiko kerusakan, dan meningkatkan daya dukung struktur secara keseluruhan. Proses pemasangan strand girder ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.6 Pemasangan Kabel Strand
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

3. Pemasangan Angkur

Anchorage berfungsi untuk menahan dan menyalurkan gaya pratekan yang ditimbulkan selama proses penarikan (*stressing*) ke dalam beton girder. Sistem ankur yang digunakan pada proyek Jembatan Lengsep STA 43+425 adalah sistem *post-tension single-end*, di mana gaya pratekan ditarik dari satu sisi (*jacking end*), sedangkan sisi lainnya berfungsi sebagai *dead end anchorage*. Anchorage yang digunakan yaitu tipe VLM 13. Spesifikasi ankur yang digunakan pada proses stressing girder ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 6.2 Spesifikasi ankur untuk stressing girder

STRANDS Dia.	ANCHOR TYPE	ANCHOR HEAD		BEARING PLATE			DUCT METAL (ID)	BURSTING / SPIRAL REINFORCEMENT			
		DA	x B	C	D	DE		DF	DG	H	No.
12,70 mm (0,5")	VLM13-7	115	x 48	150	120	100	55	150	12	50	3
	VLM13-12	155	x 52	210	180	150	80	210	12	50	6
	VLM13-19	185	x 63	250	210	155	90	225	12	50	8
15,24 mm (0,6")	VLM15-4	95	x 48	140	100	95	55	140	12	50	3
	VLM15-7	125	x 50	175	130	110	70	170	12	50	6
	VLM15-12	165	x 58	230	200	135	90	225	12	50	8
	VLM15-19	205	x 70	290	240	160	110	280	12	50	12

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Contoh ankur yang digunakan pada proses stressing girder Jembatan Lengsep STA 43+425 ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.7 Angkur Type VLM 13

Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

Berikut proses pemasangan ankur untuk pelaksanaan stressing girder yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.8 Proses Pemasangan Angkur

Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

4. Pengaplikasian *Epoxy*

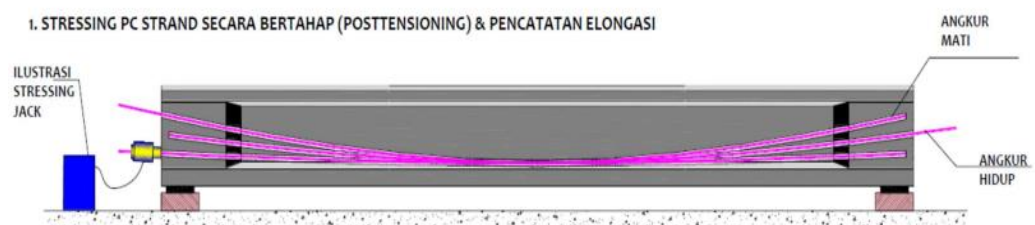
Sebelum pelaksanaan *stressing*, muka sambungan balok girder diaplikasikan lem *epoxy*. Pengaplikasian *epoxy* dilakukan pada tahap penyambungan antar girder (*joint*) dan perlindungan permukaan beton yang mengalami kontak langsung dengan elemen lain. *Epoxy* berfungsi sebagai perekat struktural antara dua permukaan beton lama dan baru, serta sebagai lapisan pelindung untuk mencegah masuknya air, debu, dan bahan kimia yang dapat menyebabkan korosi. *Epoxy* dioleskan merata pada seluruh permukaan penampang dengan ketebalan minimum 1,5mm apabila dioleskan pada kedua permukaan dan 3mm apabila dioleskan pada satu sisi permukaan sambungan.

5. Pelaksanaan *Stressing*

Pelaksanaan *stressing* berfungsi untuk memberikan gaya tekan awal pada beton. Pemberian gaya tekan ini dilakukan dengan cara menarik strand baja di dalam duct menggunakan alat hidrolik (*hydraulic jack*), sehingga menghasilkan gaya pratekan yang dapat mengimbangi tegangan tarik akibat beban yang bekerja pada struktur. Dengan adanya gaya pratekan tersebut, maka elemen beton seperti PCI Girder menjadi lebih kuat dan tahan terhadap retak. Pelaksanaan *stressing* dilakukan setelah beton girder mencapai kuat tekan minimum $0,8 \text{ f}'c = 41,4 \text{ Mpa}$ dengan metode *post-tension*. Proses *stressing* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.9 Pelaksanaan *Stressing* PCI Girder
Sumber: Dokumen Pribadi (2025)



Gambar 6.10 Ilustrasi pelaksanaan *stressing*
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

6. Pemotongan Strand

Pemotongan strand dilakukan setelah semua tendon (C1, C2, C3, dan C4) dinyatakan memenuhi kriteria elongation dan tekanan akhir sesuai hasil *Stressing Record Sheet*. Setelah *wedge* terkunci sempurna dan tekanan dari *hydraulic jack* telah dilepaskan dengan aman, sisa strand pada ujung *anchor head* dipotong menggunakan gerinda tangan dengan pisau pemotong baja. Proses ini harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan tendon yang telah ditarik tetap aman, kokoh, dan sesuai dengan desain struktur.

7. Grouting Tendon

Pekerjaan *grouting* tendon pada Jembatan Lengsep dilakukan setelah proses *stressing* dan pemotongan strand selesai. Tujuannya untuk melindungi tendon dari korosi serta mengikat strand dengan beton agar gaya pratekan dapat bekerja secara permanen. Material yang digunakan berupa *non-shrink cementitious grout* dengan rasio air-semen 0,40–0,45 dan kuat tekan minimal 45 MPa. Proses pengisian dilakukan menggunakan grout pump dengan tekanan 0,5–0,8 MPa, dimulai dari sisi bawah (*bottom-up*) hingga grout keluar homogen dari vent atas. Pengawasan mutu dilakukan melalui pemeriksaan *flow time* (10–20 detik), tekanan pompa, serta volume grout yang digunakan. Hasil pelaksanaan menunjukkan grout terdistribusi merata tanpa kebocoran, sehingga tendon terlindungi dengan baik dan siap menerima beban pratekan secara penuh.

8. Penutupan Angkur

Penutupan angkur dilakukan untuk melindungi kepala tendon dari korosi dan pengaruh cuaca. Permukaan angkur dibersihkan dari sisa grout, minyak, atau debu, kemudian disemprot compressor udara agar benar-benar kering. Setelah itu, area sekitar kepala angkur diberi lapisan epoxy bonding agent sebagai perekat, lalu ditutup menggunakan mortar non-shrink hingga rata dengan permukaan ujung girder. Pekerjaan ini bertujuan memastikan area angkur kedap air serta mencegah korosi pada strand dan pelat kepala angkur.

9. Surface Finishing

Surface finishing pada permukaan ujung girder untuk memperhalus dan merapikan hasil pengecoran. Permukaan mortar penutup yang telah mengeras digosok menggunakan *grinding wheel* agar rata dan tidak meninggalkan tonjolan. Selanjutnya dilakukan pembersihan debu dan sisa material, kemudian diaplikasikan epoxy coating sebagai lapisan pelindung akhir. Epoxy ini berfungsi mencegah penyerapan air dan memperkuat perlindungan terhadap karat pada area sekitar angkur. Pada beberapa girder, permukaan juga diberi cat pelindung beton untuk menjaga estetika dan ketahanan terhadap cuaca.

Hasil evaluasi stressing PCI-Girder Jembatan Lengsep STA 43+425 ditunjukkan pada tabel 6.3 berikut:

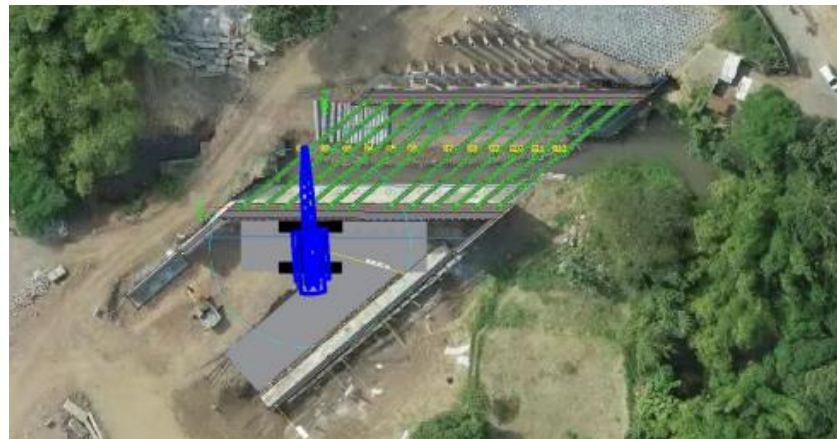
Tabel 6. 3 Hasil evaluasi stressing PCI-Girder Jembatan Lengsep STA 43+425

N O.	NOMOR BALOK GILDER	STRESSING TANGGAL	PANJANG NOMINAL	PENGUKURAN HASIL STRESSING																
				PANJANG	AKTUAL	MINIM AL	MAXSI MUM	KEBER TRIMA AN	AKTUAL	IJIN<L/1000	KEBE RTRIM AAN	ELONG-C1	KEBERTRI MAAN	ELONG-C2	KEBERTRI MAAN	ELONG-C3	KEBERTRI MAAN	ELONG-C4	KEBERTRI MAAN	
					BS EN 15050:2007				PCI Tolerances MNL 135			SNI T12-2004				SNI T12-2004				
					CHAMBER VERTIKAL				CHAMBER HORIZONTAL			AKTUAL	MIN(-)7%	AKTUAL	MIN(-)7%	AKTUAL	MIN(-)7%	AKTUAL	MIN(-)7%	
													154.752		154.752		154.752		154.752	
													MAX(+)7%		MAX(+)7%		MAX(+)7%		MAX(+)7%	
						178.048	178.048	178.048	178.048											
			(m)	(m)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
1	G.01	27/9/2025	25.60	25.595	12.00	10.90	41.90	OK	11.00	25.60	OK	168.00	OK	173.30	OK	167.00	OK	171.10	OK	
2	G.02	27/9/2025	25.60	25.59	15.10	10.90	41.90	OK	16.00	25.59	OK	174.70	OK	174.60	OK	160.30	OK	163.00	OK	
3	G.03	27/9/2025	25.60	25.595	15.00	10.90	41.90	OK	4.00	25.60	OK	158.70	OK	160.00	OK	162.10	OK	175.00	OK	
4	G.04	27/9/2025	25.60	25.59	16.00	10.90	41.90	OK	7.00	25.59	OK	162.70	OK	162.60	OK	163.00	OK	175.00	OK	
5	G.05	27/9/2025	25.60	25.585	12.00	10.90	41.90	OK	0.00	25.59	OK	162.70	OK	166.60	OK	161.60	OK	172.10	OK	
6	G.06	27/9/2025	25.60	25.58	14.50	10.90	41.90	OK	4.00	25.58	OK	166.70	OK	161.30	OK	171.00	OK	175.00	OK	
7	G.07	27/9/2025	25.60	25.59	11.00	10.90	41.90	OK	7.00	25.59	OK	168.00	OK	164.00	OK	165.60	OK	168.30	OK	
8	G.08	26/09/2025	25.60	25.59	11.50	10.90	41.90	OK	2.00	25.59	OK	166.70	OK	158.70	OK	167.00	OK	172.30	OK	
9	G.09	26/09/2025	25.60	25.59	17.50	10.90	41.90	OK	3.00	25.59	OK	158.70	OK	157.30	OK	160.30	OK	175.00	OK	
10	G.10	26/09/2025	25.60	25.59	13.00	10.90	41.90	OK	1.00	25.59	OK	157.40	OK	173.30	OK	171.00	OK	173.60	OK	
11	G.11	26/09/2025	25.60	25.6	14.50	10.90	41.90	OK	4.00	25.60	OK	157.10	OK	161.30	OK	171.00	OK	161.60	OK	
12	G.12	26/09/2025	25.60	25.59	12.00	10.90	41.90	OK	13.00	25.59	OK	168.00	OK	157.30	OK	172.30	OK	172.30	OK	

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

6.3 Metode *Erection* Girder

Pekerjaan *erection* girder merupakan tahap penting dalam pembangunan struktur atas Jembatan Sungai Lengsep STA 43+425 pada Proyek Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 3B. Jenis girder yang digunakan adalah PCI Girder dengan panjang 25,6 meter dan berat ± 40 ton per unit. Proses *erection* dilaksanakan oleh PT Sarana Rintasindah dengan dukungan alat utama berupa Crawler Crane Kobelco CKE2500 kapasitas 250 ton. Pemilihan *erection* menggunakan crane dianggap paling efektif setelah melihat situasi dan kondisi pada lokasi Jembatan Lengsep. Pekerjaan ini bertujuan untuk menempatkan girder secara presisi di atas bearing pad sesuai dengan elevasi dan posisi desain. Layout pekerjaan *erection* girder Jembatan Lengsep ditunjukkan pada gambar berikut:

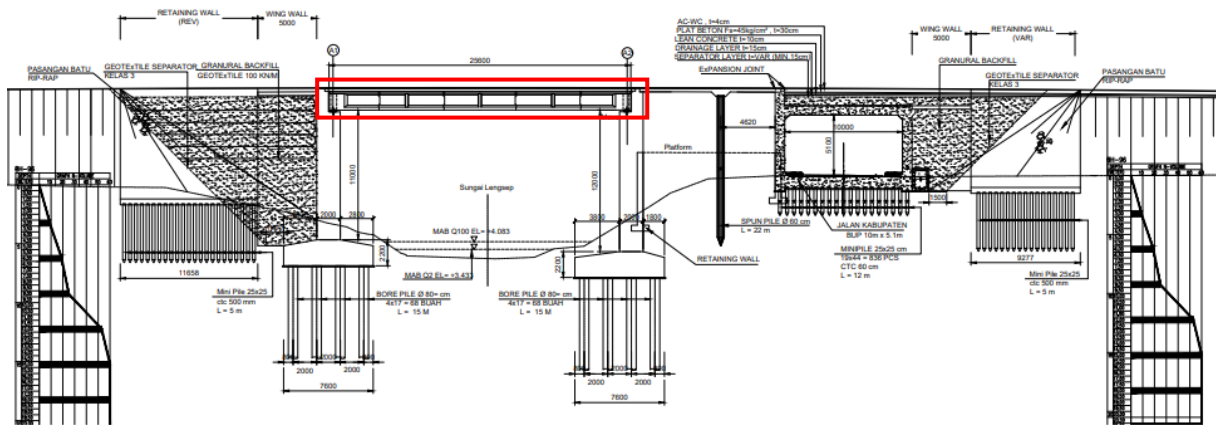


Gambar 6.11 Layout *Erection* Girder Jembatan Lengsep
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Data teknis Jembatan Lengsep adalah sebagai berikut:

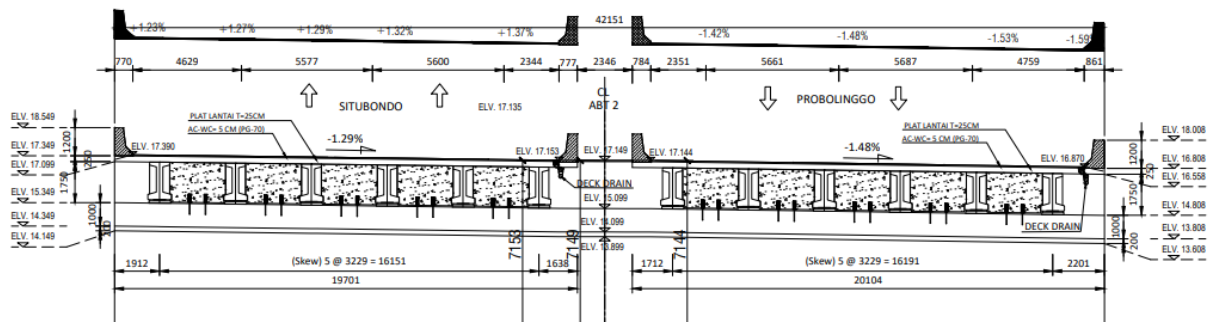
Tipe Girder	= PCI Girder
Bentang Girder	= 25,6 m
Jumlah Girder	= 12 batang
Jarak CTC	= 2,1 m
Berat Girder	= 40 ton
Tinggi Abutment	= 13 m

Pada proses *erection* girder pada jembatan, letak girder yang diamati sangat penting untuk memastikan bahwa girder terpasang dengan tepat dan stabil. Letak girder yang diamati pada Jembatan Lengsep ditunjukkan pada gambar 6.12 berikut:



Gambar 6.12 Letak Girder yang Diamati
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Jumlah PC-I Girder yang digunakan pada Jembatan Lengsep sebanyak 12 buah dengan jarak antara masing-masing girder yaitu 210 cm. Detail jumlah dan jarak PC-I Girder terdapat pada cross section Jembatan Centong ditunjukkan pada gambar 6.13 berikut:



Gambar 6.13 Cross Section Jembatan Lengsep
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

6.3.1 Peralatan yang Digunakan

1. *Crawler Crane* Kobelco CKE2500 (250 ton)

Crane utama yang digunakan adalah *Crawler Crane* Kobelco CKE2500 dengan kapasitas maksimum 250 ton. Alat ini memiliki sistem penggerak *crawler track* (rantai baja) yang memberikan stabilitas tinggi di permukaan tanah yang tidak rata. Crane digunakan untuk mengangkat dan memposisikan girder dari area *stockyard* menuju pier head. Berikut *Crawler Crane* ditunjukkan pada gambar 6.14 berikut:



Gambar 6.14 Crawler Crane Kobelco CKE 2500
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

Data spesifikasi main crane yang digunakan adalah sebagai berikut:

Jenis Pesawat Angkat	: Crawler Crane
Tipe	: CKE2500
Pabrik Pembuatan	: KOBELCO
Tenaga Penggerak	: Diesel Engine
Kapasitas	: 250 ton
Tahun Pembuatan	: 2019

2. Spreader Beam (ASTM A36, Kapasitas 60 Ton)

Spreader beam digunakan untuk menyebarkan beban angkat dari titik sling ke dua titik pengangkatan di girder, sehingga gaya yang diterima girder merata dan tidak menimbulkan momen puntir. Spreader beam terbuat dari baja struktural ASTM A36 dengan kapasitas beban 60 ton (hasil uji load test). Perangkat ini dipasang di antara *hook crane* dan sling baja, dan berfungsi untuk menjaga agar sudut pengangkatan tetap optimal ($\leq 60^\circ$) serta meminimalkan deformasi pada saat lifting. Gambar Spreader Beam ditunjukkan pada gambar 6.15 berikut:



Gambar 6.15 Spreader Beam
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

3. Sling Baja Ø2 Inch x 8 m

Sling baja merupakan tali kawat baja (wire rope) yang digunakan untuk menghubungkan girder dengan spreader beam. Sling yang digunakan memiliki diameter 2 inch dan panjang 8 meter, dengan breaking load sebesar 192 ton. Sebelum digunakan, sling diperiksa secara visual terhadap adanya

kawat putus, keausan, atau deformasi. Pemeriksaan ini wajib dilakukan setiap hari oleh *rigger* bersertifikat. Selama pengangkatan, sling dipasang dengan sudut pengangkatan maksimum 60° dari sumbu vertikal agar tidak melebihi kapasitas kerjanya. Sling Baja yang digunakan ditunjukkan pada gambar 6.16 berikut:



Gambar 6.16 Sling baja
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

4. Hook Crane

Hook crane dilengkapi dengan sistem *safety latch* untuk mencegah lepasnya sling saat pengangkatan berlangsung. Hook crane ditunjukkan pada gambar 6.17 berikut:



Gambar 6.17 Hook Crane
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

5. Steel Plate

Plat baja digunakan sebagai alas (base plate) di bawah *crawler crane* agar beban crane dan girder terdistribusi merata ke tanah. Ukuran plat yang digunakan adalah $6\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 20\text{ mm}$. Plat ini ditempatkan di jalur lintasan crane serta di area *outrigger* sebagai penguat daya dukung tanah (ground bearing pressure). Dengan pemasangan plat ini, tekanan kontak tanah dapat dijaga di bawah 250 kN/m^2 , sehingga mencegah crane dari risiko tenggelam atau kehilangan keseimbangan. Steel plate ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.18 Steel Plate
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

6. *Windsock*

Windsock digunakan untuk mengukur arah dan kecepatan angin. Setiap satu strip yang terisi angin menandakan kecepatan angin sebesar 3 knot atau 5.5 km/jam. Contoh *windsock* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.19 *Windsock*
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

7. *Anemometer*

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin secara akurat. Penggunaan alat ini cukup sederhana yaitu tinggal mengarahkan alat ke hembusan angin, kemudian akan muncul angka kecepatan angin secara otomatis. Contoh anemometer ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 6.20 *Anemometer*
Sumber : Dokumen Pribadi (2025)

6.3.2 Proses Pelaksanaan Erection

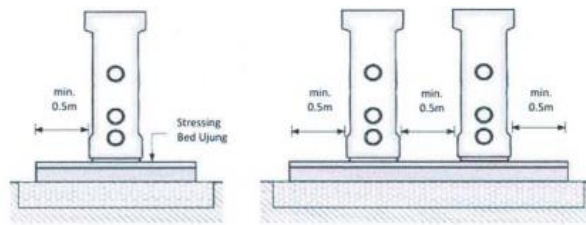
Proses pelaksanaan *erection* girder dilakukan dengan beberapa tahap yang diuraikan sebagai berikut:

1. Persiapan Area

Perbaikan tanah dasar dilakukan untuk meningkatkan nilai CBR tanah dasar atau daya dukung tanah sehingga mampu menahan beban dengan deformasi yang diizinkan. Kerataan elevasi tanah dan posisi bed harus rata dan kuat (tidak terjadi settlement). Pengukuran zona erection crane juga diukur dan ditandai untuk memudahkan operator crane memposisikan alat beratnya

2. Penempatan Segmental Balok PCI Girder

Segmen balok ditempatkan diatas sleeper/ stressing bed sesuai dengan urutan segmen girder. Penempatan segmen girder harus dipastikan lurus dan rata. Beri jarak antar segmen girder $\pm 10 - 15$ cm agar memudahkan pada saat aplikasi epoxy permukaan sambungan antar segmen balok girder yang ditunjukkan pada gambar 6.21 berikut:



Gambar 6.21 Penempatan Segmental Girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO

3. Pengecekan Cuaca

Erection girder hanya dapat dilaksanakan apabila kondisi cuaca dan lingkungan mendukung untuk memastikan keselamatan serta kualitas pekerjaan. Pekerjaan ini harus dihentikan atau ditunda jika kecepatan angin melebihi 16 knot, karena angin kencang dapat mengganggu stabilitas girder saat proses pengangkatan dan pemasangan, yang berpotensi menimbulkan risiko kecelakaan. Oleh karena itu, sebelum memulai pekerjaan, perlu dilakukan pemantauan kondisi cuaca secara berkala dan koordinasi dengan tim keselamatan untuk memastikan pekerjaan dapat dilakukan dengan aman dan efektif.

4. *Loading Test*

Loading Test dilaksanakan sebelum pekerjaan erection dimulai, bertujuan untuk memastikan kapasitas sling dan crane. Loading tes selama + 5 menit, diamati penurunan setiap 5 menit / kesepakatan dengan konsultan. Loading tes menggunakan alat yang sudah disepakati untuk erection girder.

5. Erection Girder

a. Rigging dan Pengangkatan

Pengambilan girder dimulai dari penyusunan girder yang sudah direncanakan penempatannya dan akan diletakkan posisi yang sudah ditentukan. Sling baja Ø2 inch dan spreader beam 60 ton dipasang pada titik angkat girder sesuai lifting plan. Setelah trial lifting ± 50 cm, crane utama menagangkar girder. Gerakan dikontrol dengan tagline rope agar girder tidak berayun

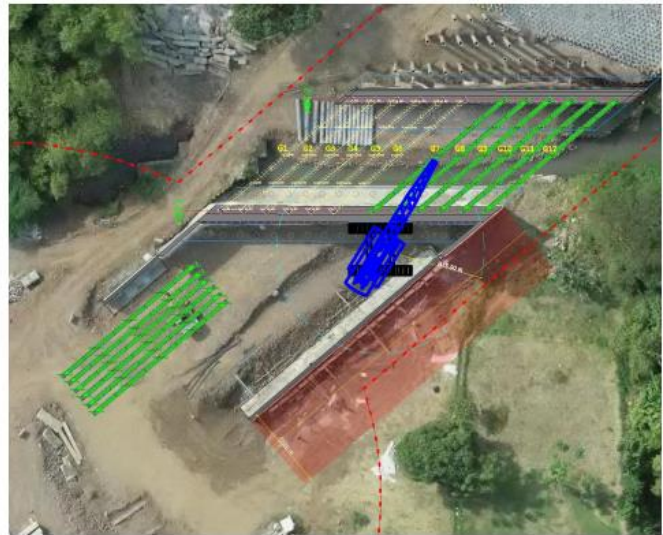
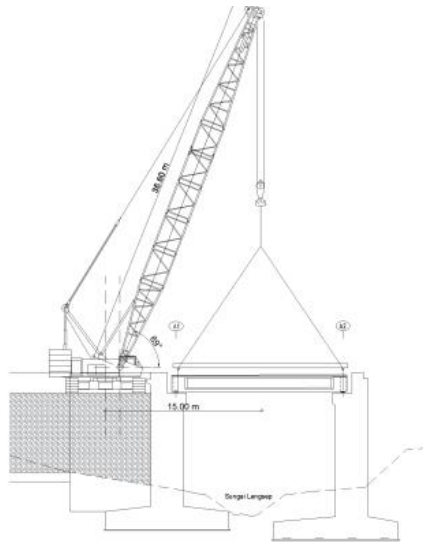
b. Pemindahan dan Peletakan

Girder dipindahkan perlahan menuju pier head dan diturunkan di atas beraing pad sesuai hasil pengukuran surveyor. Posisi diatur dengan toleransi ± 3 mm, CTC 2,10 m.

c. Penguncian dan Penstabilan

Setelah dua girder terpasang, dipasang bracing tumpuan dan tengah untuk menjaga kestabilan. Sling dilepas setelah girder stabil dan alat dipindahkan ke posisi berikutnya.

Ilustrasi metode erection ditunjukkan pada gambar 6.22 berikut:



Gambar 6.22 Ilustrasi Metode *Erection* Girder Jembatan Lengsep
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

6.4 Perhitungan Momen dan Lendutan PCI Girder

Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui besar momen yang bekerja pada girder serta besarnya lendutan yang terjadi akibat beban sendiri, beban lalu lintas, dan gaya prategang. Selain itu, perhitungan ini juga digunakan untuk memverifikasi bahwa penampang girder mampu menahan gaya internal yang timbul serta bahwa nilai lendutan berada dalam batas yang diizinkan oleh standar perencanaan.

6.4.1 Resume Perhitungan

A.) Spesifikasi Girder

Panjang balok	= 25,6 m
Panjang bentang (L)	= 25 m
Tinggi girder	= 1,6 m
Jarak antar girder (s)	= 2,1 m
Tebal slab	= 0,2 m
Mutu beton girder	= $f'_c = 51,7$ Mpa
Mutu beton slab	= $f'_c = 30$ Mpa
Jumlah tendon	= C1 = 7 strand C2,C3,C4 = 12 strand
Gaya transfer (P^t)	= 127,24 kN per strand
Gaya efektif (P_e)	= 113,00 kN per strand
Berat jenis beton	= 24 kN/m ³
Panjang tendon	= $\pm 25,3$ m
Berat total girder (perkiraan)	= 40 ton
Susunan per segmen ditunjukkan pada tabel berikut:	

Tabel 6.4 Susunan segmen Girder PCI

Segmen Girder	1	2	3	4	5
Length (m)	5	5	5.6	5	5

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO

B.) Pembebanan

1.) Beban Mati

Balok Precast	= 1.3239 t/m	(Tabel 2 SNI 1725-2016)
Plat lantai	= 1,8185 t/m	(Tabel 2 SNI 1725-2016)
Aspal	= 0,2310 t/m	(Tabel 2 SNI 1725-2016)
Air	= 0,1029 t/m	(Tabel 2 SNI 1725-2016)
Diafragma	= 1,0622 ton	(Tabel 2 SNI 1725-2016)
Jumlah diafragma tengah	= 3 pcs	
Tebal diafragma	= 0.2 m	
Tebal Plat	= 0,25 meter	
Tebal Aspal	= 0,05 meter	

2.) Beban Hidup

Berdasarkan standart pembebanan untuk jembatan SNI 1725-2016

Beban lajur "D"

Beban terbagi rata (q) = 0.9 t/m² untuk L<30 m (Pasal 6.3.1.2 RSNI T-02-2005)

Faktor Beban Dinamis (DLA) = 0.4 untuk L<50 m

Beban garis terpusat (KEL) = 49 kN/m

Faktor distribusi (DF) = 1.00

Beban hidup :

Beban terbagi rata q' = DF x q x s = 18.9 kN/m

Beban garis terpusat p' = (DF+DLA) x KEL x s = 144.06 kN

C.) Kontrol Stress Balok Girder (Data PT Parama Karya Mandiri KSO)

Kondisi Awal

Stress Atas	= 4.5 kg/cm ²	>	-16.39 kg/cm ²
Stress Bawah	= 201.71 kg/cm ²	<	253.05 kg/cm ²

Kondisi Layan I

Stress Atas	= 116.89 kg/cm ²	<	237.24 kg/cm ²
Stress Bawah	= 8.63 kg/cm ²	>	-36.66 kg/cm ²

Kondisi Layan III

Stress Atas	= 110.71 kg/cm ²	<	237.24 kg/cm ²
Stress Bawah	= 26.09 kg/cm ²	>	-36.66 kg/cm ²

D.) Kontrol Defleksi Balok Girder (Data PT Parama Karya Mandiri KSO)

Camber akibat stressing	= 1.173 cm
Camber pada kondisi erection	= 1.763 cm
Camber kondisi final	= -0.879 cm
Defleksi akibat creep	= -2.230 cm
Defleksi akibat beban hidup	= -1.090 cm

Berdasarkan SNI 2833:2016, lendutan maksimum yang diizinkan pada kondisi beban mati dan hidup adalah $\frac{L}{800} = 3.13$ cm, artinya girder aman terhadap deformasi dan tidak berpotensi menimbulkan keretakan atau gangguan struktural.

E.) Kapasitas Momen Balok Girder

$$M_u = 1129.456 \text{ tm}$$

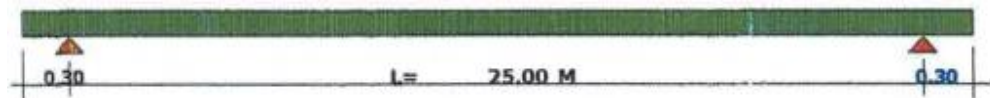
$$\phi M_n = 960.037 \text{ tm}$$

$$\frac{\phi M_n}{M_u} > 1 = \frac{960.04}{808.95} = 1.187 \text{ (OK)}$$

6.4.2 Perhitungan Teknis

A.) Data

Berikut *profile* memanjang girder Jembatan Lengsep STA 43+425 ditunjukkan pada gambar 6.23 berikut:



Gambar 6.23 *Profile* Memanjang Girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

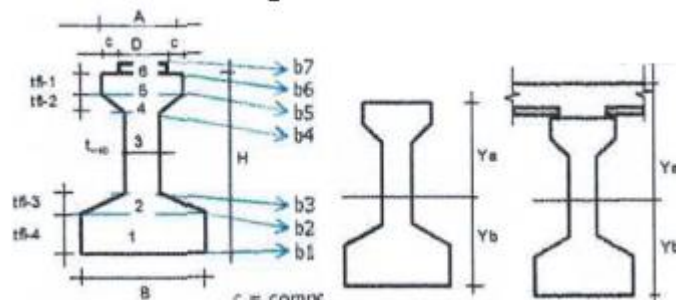
$$\text{Panjang balok} = 25.6 \text{ m}$$

$$\text{Jarak antar balok (s)} = 2.1 \text{ m}$$

$$\text{Tebal aspal} = 0.05 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi genangan air} = 0.05 \text{ m}$$

Cross section balok girder ditunjukkan pada gambar 6.24 berikut:



Gambar 6.24 *Profile* Melintang Girder
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Penampang Balok	Data Tinggi	Data lebar
D = 54 cm	Badan = 100 cm	b1 = 65 cm
H = 160 cm	Coak atas = 7 cm	b2 = 65 cm
A = 70 cm	tfl-1 = 13 cm	b3 = 18 cm
B = 65 cm	tfl-2 = 7.5 cm	b4 = 18 cm
tweb = 18 cm	tfl-3 = 10 cm	b5 = 70 cm
Coakan / c = 8 cm	tfl-4 = 22.5 cm	b6 = 54 cm
	Total = 160 cm	b7 = 54 cm

B.) Material

1.) Beton

a.) Komponen pra-cetak K

$$\begin{aligned} \text{Kondisi akhir } f_c' &= \\ &= 527.2 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 51.7 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Kondisi awal f_{ci}	$= 80\% \times 527$	$= 421.8 \text{ kg/cm}^2$
Tegangan ijin awal =		
- Tegangan tekan	$= 0.60 \times f_{ci}$	$= 24.82 \text{ Mpa}$ $= 253.1 \text{ kg/cm}^2$
- Tegangan tarik	$= -0.25 \times \sqrt{f_{ci}}$	$= -1.61 \text{ Mpa}$ $= -16.4 \text{ kg/cm}^2$
Tegangan ijin akhir =		
- Tegangan tekan	$= 0.45 \times f_{c'}$	$= 23.27 \text{ Mpa}$ $= 237.2 \text{ kg/cm}^2$
- Tegangan tarik	$= -0.50 \times \sqrt{f_{c'}}$	$= -3.60 \text{ Mpa}$ $= -36.7 \text{ kg/cm}^2$
Modulus elastisitas E_p	$= 4700 \times \sqrt{f_{c'}}$ $= 3.379 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ karena $> 30 \text{ Mpa}$	
w_c	$= 2500 \text{ kg/m}^3$	

b.) Komponen pelat K

Kondisi akhir $f_{c'}$	$=$	$= 29.1.1 \text{ kg/cm}^2$
Tegangan ijin akhir	$=$	
- Tegangan tekan	$= 0.45 \times f_{c'}$	$= 12.85 \text{ Mpa}$ $= 131 \text{ kg/cm}^2$
- Tegangan tarik	$= -0.50 \times \sqrt{f_{c'}}$	$= -2.67 \text{ Mpa}$ $= -27.2 \text{ kg/cm}^2$
Modulus elastisitas E_p kg/cm^2	$= 4700 \times \sqrt{f_{c'}}$	$= 2.511 \times 10^5$
w_c	$= 2400 \text{ kg/m}^3$	

2.) Kabel *Prestressing*

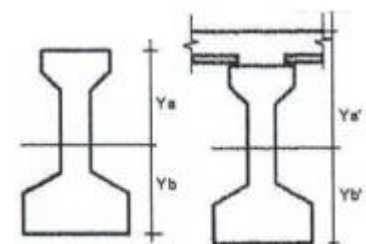
Diameter strand	$= 12.7 \text{ mm}$
Luas Penampang Efektif	$= 0.9871 \text{ cm}^2$
Modulus Elastisitas E	$= 1.960.000 \text{ kg/cm}^2$
Kuat tarik ultimit	$= 18960 \text{ kg/cm}^2$

3.) Tulangan

Diameter	$= 13 \text{ mm}$
f_y	$= \text{BJTS 420} = 4284 \text{ kg/cm}^2$
Modulus Elastisitas	$= 2.040.000 \text{ kg/cm}^2$
Eff. Section Area	$= 1.33 \text{ cm}^2$

C.) Analisis section

$E_p 1$	$= 2.5114 \text{ kg/cm}^2$	(Girder)
$E_p 2$	$= 3.3795 \text{ kg/cm}^2$	(Slab)
N	$= E_p 1 / E_p 2$	
N	$= 0.7431$	



Gambar 6.25 Section Girder
(Sumber : PT PKM KSO 2025)

1.) Balok Precast

Perhitungan momen inersia girder precast ditunjukkan pada tabel 6.5 berikut:

Tabel 6.5 Perhitungan momen inersia girder precast

(Satuan dalam cm)

BAG	TINGGI BAGIAN	LEBAR		AREA	LEVEL	Yb	AREA*Yb	Ia	I	Ix
		BOTTOM	TOP							
6	7.0	54.0	54.0	378.00	153.0	156.5	59,157	1,544	2,322,575	2,324,119
5	13.0	70.0	70.0	910.00	140.0	146.5	133,315	12,816	4,255,758	4,268,574
4	7.5	18.0	70.0	330.00	132.5	137.0	45,206	1,367	1,143,857	1,145,224
3	100.0	18.0	18.0	1,800.00	32.5	82.5	148,500	1,500,000	34,628	1,534,628
2	10.0	65.0	18.0	415.00	22.5	26.6	11,021	3,089	1,103,151	1,106,240
1	22.5	65.0	65.0	1,462.50	0.0	11.3	16,453	61,699	6,538,519	6,600,218
TOTAL	160.0			5,295.50		78.1	413,652	1,580,514	15,398,489	16,979,003

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

2.) Balok Komposit

Perhitungan momen inersia girder komposit ditunjukkan pada tabel 6.6 berikut:

Tabel 6.6 Perhitungan momen inersia girder komposit

(Satuan dalam cm)

BAG	TINGGI BAGIAN	LEBAR		AREA	LEVEL	Yb	AREA*Yb	Ia	I	Ix
		BOTTOM	TOP							
3	25.0	210.0	210.0	3,901.47	160.0	172.5	673,003	203,201	11,523,081	11,726,283
2	0.0	54.0	54.0	0.00	160.0	160.0	0	0	0	0
1	160.0	65.0	54.0	5,295.50	0.0	78.1	413,652	16,979,003	8,489,548	25,468,551
TOTAL	185.0			9,196.97		118.2	1,086,655	17,182,204	20,012,729	37,194,933

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

3.) Resume

Resume perhitungan momen inersia girder precast dan komposit ditunjukkan pada tabel 6.7 berikut:

Tabel 6.7 Resume perhitungan inersia

(Satuan dalam cm)

URAIAN		AREA	Ya	Yb	Ix	Wa	Wb
Balok Precast		5,295.50	81.89	78.11	16,979,003	207,349	217,362
Balok Composite (Composite)		9,196.97	66.65	118.15	37,194,933	556,424	314,801
	(Precast)			41.85		888,846	

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

D.) Pembebanan

1.) Beban Mati

Balok Precast	= 1.3239 t/m (Tabel 2 SNI 1725-2016)
Plat lantai	= 1,8185 t/m (Tabel 2 SNI 1725-2016)
Aspal	= 0,2310 t/m (Tabel 2 SNI 1725-2016)
Air	= 0,1029 t/m (Tabel 2 SNI 1725-2016)
Diafragma	= 1,0622 ton (Tabel 2 SNI 1725-2016)
Jumlah diafragma tengah	= 3 pcs
Tebal diafragma	= 0.2 m
Tebal Plat	= 0,25 meter
Tebal Aspal	= 0,05 meter

2.) Beban Hidup

Berdasarkan standart pembebanan untuk jembatan SNI 1725-2016

Beban lajur “D”

Beban terbagi rata (q) = 0.9 t/m² untuk L < 30 m
(Pasal 6.3.1.2 RSNI T-02-2005)

Faktor Beban Dinamis (DLA) = 0.4 untuk L < 50 m

Beban garis terpusat (KEL) = 49 kN/m

Faktor distribusi (DF) = 1.00

Beban hidup :

Beban terbagi rata q' = DF x q x s = 18.9 kN/m

Beban garis terpusat p' = (DF+DLA) x KEL x s = 144.06 kN

Beban Truk “T”

Beban hidup pada lantai jembatan berupa beban roda ganda oleh truk (beban T) yang besarnya sebagai berikut:

(T) = 225 kN

Faktor Beban Dinamis (DLA) = 0.4 untuk L < 50 m

Beban truk (P_{TT}) = (1+DLA) x T = 315 kN

Gaya geser dan momen pada T-Girder akibat beban truk “T”:

$$\begin{aligned} V_{TT} &= \frac{(\frac{9}{8} \times L - \frac{1}{4} \times 10)}{L \times P_{TT}} \\ &= \frac{(\frac{9}{8} \times 25 - \frac{1}{4} \times 10)}{25 \times 315} \\ &= 401.63 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{TT} &= V_{TT} \times L/2 - P_{TT} \times 5 \\ &= 401.63 \times 25/2 - 315 \times 5 \\ &= 3445.31 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser dan momen yang terjadi akibat beban hidup, diambil yang memberikan pengaruh terbesar terhadap T-Girder diantara beban “D” dan beban “T”.

Gaya geser maksimum akibat beban, T V_{TT} = 401.63 kN

Momen maksimum akibat beban, D M_{TD} = 2376.94 kNm

3.) Gaya Rem (TB) SNI 1725-2016 Pasal 8.7

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

a. 25% dari berat truk desain

$$25\% \times 225 = 56.25 \text{ kN}$$

b. 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata

$$\text{BTR } 5\% \times 500 + 472.5 = 48.63 \text{ kN}$$

Diambil gaya sebesar 56.25 kN

Gaya rem (TTB) = 56.25 kN

Beban momen akibat gaya rem (M) = 155.73 kN/m

4.) Beban Angin (EW) SNI 1725-2016 Pasal 9.6.1.2

Tekanan angin rencana harus dikerjakan baik pada struktur jembatan maupun pada kendaraan yang melintasi jembatan. Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1.46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan. Kecuali jika ditentukan didalam pasal ini, jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka komponen yang bekerja tegak lurus maupun paralel terhadap kendaraan untuk berbagai sudut dapat diambil seperti yang ditentukan dalam tabel berikut, dimana arah sudut ditentukan tegak lurus terhadap arah permukaan kendaraan. Komponen beban angin yang bekerja pada kendaraan ditunjukkan pada tabel 6.8 berikut:

Tabel 6.8 Komponen Beban Angin Yang Bekerja Pada Kendaraan

Sudut	Komponen tegak lurus	Komponen sejajar
derajat	N/mm	N/mm
0	1.46	0.00
15	1.28	0.18
30	1.20	0.35
45	0.98	0.47
60	0.50	0.55

Sumber : SNI 1725:2016

$$T_{EW} = 1.46 \text{ kN/m}^2$$

Bidang vertikal yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi 1.8 m diatas lantai jembatan

$$h = 1.8 \text{ m}$$

$$\text{Jarak antar roda kendaraan } x = 1.75 \text{ m}$$

Beban akibat transfer beban angin ke lantai jembatan,

$$\begin{aligned}
 Q_{EW} &= \frac{\frac{1}{2} x h}{x x T_{EW}} \\
 &= \frac{\frac{1}{2} x 1.8}{1.75 x 1.46} \\
 &= 0.751 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

5.) Pengaruh Temperatur ET (SNI 1725-2016 Pasal 9.3.1.1)

Berikut temperature jembatan rata-rata nominal ditunjukkan pada tabel berikut

Tabel 6.9 Temperature Jembatan Rata-Rata

Tipe bangunan atas	Temperatur jembatan rata-rata minimum (t)	Temperatur jembatan rata-rata maksimum
Lantai beton di atas gelagar atau boks beton	15°C	40°C
Lantai beton di atas gelagar, boks atau rangka baja	15°C	40°C
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks atau rangka baja	15°C	45°C
CATATAN (1) Temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5°C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m diatas permukaan laut.		

Sumber : SNI 1725-2016

$$DT = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Koef muai panjang untuk beton } a = 1.0.E-05 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Panjang bentang girder	L	= 25.00 m
Shear stiffness of elastomeric bearing	k	= 15000 kN/m
Temperature movement	d	= $\alpha \times \Delta T \times L$ = 0.0063 m
Gaya akibat temperature movement	F_{ET}	= $k \times d$ = 93.75 kN
Tinggi girder	h	= 1.60 m
Eksentrisitas	$y_b = e$	= 0.78 m
Momen akibat pengaruh Temperature	M	= $F_{ET} \times e$ = 73.232 kNm

6.) Beban Gempa

Perhitungan koefisien beban gempa horizontal dapat dihitung menggunakan rumus:

$$K_h = C \times S$$

Dimana:

K_h	= Koefisien beban gempa horizontal
C	= Koefisien spektra dasar untuk wilayah gempa, waktu getar, dan kondisi tanah setempat
S	= Faktor tipe struktur yang berhubungan dengan kapasitas penyerapan energi gempa (daktalitas) dari struktur

Waktu getar struktur digitung dengan rumus

$$T = 2 \times p \times O \left(\frac{W_t}{g \times K_p} \right)$$

Dimana:

W_t = Berat total yang berupa berat sendiri dan beban mati tambahan

K_p = Kekakuan struktur yang merupakan gaya horizontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan

g = Percepatan gravitasi bumi ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Berat total yang berupa berat sendiri dan beban mati tambahan:

$$W_t = Q_{MS} + Q_{MA}$$

Berat sendiri (Q_{MS}) = 27.54 kN/m

Beban mati tambahan (Q_{MA}) = 3.34 kN/m

Panjang bentang (L) = 25 m

Berat total, $W_t = (Q_{MS} + Q_{MA}) \times L$
= $(27.54 + 3.34) \times 25$
= 771.933 kN

Momen inersia penampang girder $I_x = 0.3719 \text{ m}^4$

Modulus elastis beton $E_c = 3379 \text{ Mpa}$

Kekakuan lentur girder $K_p = 48 \times E_c \times I_x / L^3 = 3862 \text{ kN/m}$

Waktu getar $T = 2 \times p \times O \left(\frac{W_t}{g \times K_p} \right)$
= 0.8969 detik

Koefisien tanah dasar termasuk sedang (medium).

Lokasi wilayah gempa wilayah = 4

Koefisien geser dasar (C) = 0.5

Untuk struktur jembatan dengan daerah sendi plastis beton bertulang, maka faktor tipe struktur dihitung dengan rumus,

$$S = 1.0 \times F$$

Dengan, $F = 1.25 - 0.025 \times n$ dan F harus diambil ≥ 1

F = faktor perangkaan

n = jumlah sendi plastis yang menahan deformasi struktur, untuk nilai $n = 1$ maka:

$$F = 1.25 - 0.025 \times n = 1.225$$

Faktor tipe struktur,

$$\begin{aligned} S &= 1.0 \times F \\ &= 1.0 \times 1.225 \\ &= 1.225 \end{aligned}$$

Koefisien beban gempa horizontal,

$$\begin{aligned} K_h &= C \times S \\ &= 0.5 \times 1.225 \\ &= 0.306 > 0.10 \end{aligned}$$

Diambil koefisien gempa vertikal, $K_v = 0.306$

Gaya gempa vertikal,

$$\begin{aligned} T_{EQ} &= K_v \times W_t \\ &= 0.306 \times 771.933 \\ &= 236.405 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$Q_{EQ} = \frac{T_{EQ}}{L} = \frac{236.405}{25.6} = 9.456 \text{ kN/m}$$

Berikut resume beban ditunjukkan pada tabel 6.10 berikut:

Tabel 6.10 Resume beban

Resume Beban						
No	Tipe Beban	Faktor Ultimit	Kode Beban	Q	P	M
				Ton / Meter	Ton	Ton Meter
1	Balok Precast	1.2	q1	1.32		
2	Pelat Lantai & Prpt	1.3	q2	1.82		
3	Beban aspal, air	2	q3	0.33		
4	Beban diafragma	1.3	q4	0.17		
5	Beban Lalu Lintas	1.8	TD	1.89	14.41	
6	Gaya rem	1.8	TB			15.57
7	Pengaruh temperatur	1.2	ET			7.32
8	Beban angin	1.2	EW	0.08		
9	Beban gempa	1	EQ	0.95		

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

E.) Perhitungan Momen

Analisis momen dilakukan untuk menentukan besarnya momen lentur yang bekerja pada girder akibat kombinasi beban mati, beban tambahan, beban lalu lintas, gaya rem, temperatur, angin, dan gempa. Perhitungan ini digunakan untuk mengetahui titik kritis lentur dan menjadi dasar dalam penentuan kebutuhan tulangan lentur pada girder. Rekapitulasi hasil analisis momen pada setiap titik pengamatan (POT 1 hingga POT 6) dapat dilihat pada tabel 6.11 berikut.

Tabel 6.11 Rekapitulasi Analisis Momen

(Satuan dalam TON-METER)

TYPE	KETERANGAN	POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7
MS	1. Balok Precast	0.30	1.00	2.40	5.00	8.00	10.00	12.800
Subtotal MS		4.90	15.89	35.90	66.19	90.02	99.29	103.37
MA	2. Pelat Lantai & Parapet	6.74	21.82	49.32	90.92	123.66	136.39	141.99
	3. Beban aspal, air	1.24	4.01	9.06	16.70	22.71	25.04	26.07
	4. Beban diafragma	0.63	2.04	4.61	8.50	11.56	12.75	13.27
Subtotal MA		8.60	27.87	62.98	116.12	157.92	174.18	181.33
TD	5. Beban Lalu lintas D	7.00	22.68	51.26	94.50	128.52	141.75	147.57
	5. Beban Lalu lintas T	4.27	13.83	31.26	57.62	78.37	86.44	89.99
Subtotal TD		11.27	36.51	82.51	152.12	206.89	228.19	237.56
TB	6. Gaya rem	0.19	0.62	1.49	3.11	4.98	6.23	7.97
Subtotal TB		0.19	0.62	1.49	3.11	4.98	6.23	7.97
ET	7. Temperatur	0.09	0.29	0.70	1.46	2.34	2.93	3.75
Subtotal ET		0.09	0.29	0.70	1.46	2.34	2.93	3.75
EW	8. Beban angin	0.28	0.90	2.04	3.75	5.11	5.63	5.86
Subtotal EW		0.28	0.90	2.04	3.75	5.11	5.63	5.86
EQ	9. Beban gempa	3.50	11.35	25.65	47.28	64.30	70.92	73.83
Subtotal EQ		3.50	11.35	25.65	47.28	64.30	70.92	73.83
Layan I	= MS+MA+TD+TB+EW+ET	25.33	82.08	185.63	342.77	467.25	516.44	539.84
Layan III	= MS+MA+0.8TD+0.8TB+ET	22.76	73.75	166.79	307.97	419.78	463.93	484.67

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Layan I, digunakan untuk mengevaluasi perilaku struktur pada kondisi layan normal (operasional harian). Sedangkan Layan III digunakan untuk kondisi layanan ketika beban lalu lintas dan gaya rem tidak terjadi secara penuh pada saat bersamaan, sehingga diberi faktor reduksi 0.8.

$$\text{Layan I} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB} + \text{EW} + \text{ET}$$

$$\text{Layan III} = \text{MS} + \text{MA} + 0.8\text{TD} + 0.8\text{TB} + \text{ET}$$

Keterangan :

- MS = Beban mati utama
- MA = Beban mati tambahan
- TD = Beban lalu lintas
- TB = Beban rem
- ET = Temperatur
- EW = Beban angin
- EQ = Beban gempa

F.) Perhitungan Lintang

Analisis gaya lintang dilakukan untuk mengetahui besarnya gaya geser yang bekerja pada girder di sepanjang bentang jembatan. Gaya lintang ini penting untuk memastikan kemampuan elemen struktur menahan geser, terutama di daerah dekat tumpuan tempat geser maksimum terjadi. Perhitungan meliputi kontribusi seluruh jenis beban dan disajikan sebagai dasar perencanaan tulangan geser. Rekapitulasi nilai lintang pada tiap titik penampang ditampilkan pada tabel 6.12 berikut.

Tabel 6.12 Rekapitulasi Perhitungan Lintang

(Satuan dalam TON)

TYPE	KETERANGAN	POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7
MS	1. Balok Precast	0.30	1.00	2.40	5.00	8.00	10.00	12.80
Subtotal MS		16.15	15.22	13.37	9.93	5.96	3.31	-0.40
MA	2. Pelat Lantai & Parapet	22.19	20.91	18.37	13.64	8.18	4.55	-0.55
	3. Beban aspal, air	4.07	3.84	3.37	2.50	1.50	0.83	-0.10
	4. Beban diafragma	2.07	1.95	1.72	1.27	0.76	0.42	-0.05
Subtotal MA		28.33	26.71	23.46	17.42	10.45	5.81	-0.70
TD	5. Beban Lalu lintas D	23.06	21.74	19.09	14.18	8.51	4.73	-0.57
	5. Beban Lalu lintas T	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20
Subtotal TD		30.26	28.94	26.29	21.38	15.71	11.93	6.64
TB	6. Gaya rem	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
Subtotal TB		0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
ET	7. Temperatur	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Subtotal ET		0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
EW	8. Beban angin	0.92	0.86	0.76	0.56	0.34	0.19	-0.02
Subtotal EW		0.92	0.86	0.76	0.56	0.34	0.19	-0.02
EQ	9. Beban gempa	11.54	10.87	9.55	7.09	4.26	2.36	-0.28
Subtotal EQ		11.54	10.87	9.55	7.09	4.26	2.36	-0.28
Layan I	= MS+MA+TD+TB+EW+ET	76.58	72.65	64.79	50.20	33.37	22.15	6.44
Layan III	= MS+MA+0.8TD+0.8TB+ET	69.48	65.87	58.65	45.24	29.77	19.45	5.01

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Kabel Prestressing

Perhitungan kabel *prestress* dilakukan untuk menentukan konfigurasi kabel, gaya transfer awal, serta gaya efektif setelah mempertimbangkan kehilangan prategang (*prestress losses*).

1.) Profil Kabel

Profil kabel disusun berdasarkan kebutuhan momen lentur dan kondisi geometrik girder pada setiap titik penampang. Tabel berikut menyajikan data lengkap mengenai profil kabel, gaya prestress transfer, serta gaya prestress efektif yang digunakan sebagai dasar perhitungan kapasitas lentur elemen prategang. Profil strand ditunjukkan pada tabel 6.13 berikut:

Tabel 6.13 Profil strand

CABLE	NOS	PROFIL		POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7
		EDGE	MID							
1	7	104.0	50.0	101.50	95.89	85.65	70.05	57.59	52.58	50.00
2	12	76.0	30.0	73.87	69.09	60.37	47.08	36.47	32.20	30.00
3	12	48.0	10.0	46.24	42.79	35.09	24.11	15.34	11.82	10.00
4	12	20.0	10.0	19.54	18.50	16.60	13.71	11.41	10.48	10.00
5	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	43	57.12	22.09	55.46	51.74	44.96	34.70	26.63	23.49	22.11

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

2.) Gaya Prestressing Transfer

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya Prestressing Transfer} &= 0.69 \times 43 \times 0.9871 \times 18960 \\
 &= 558.300 \text{ kg (total)} \\
 &= 127,24 \text{ kN/strands} \\
 &= 12.979 \text{ kg/strands}
 \end{aligned}$$

3.) Gaya Prestressing Efektif

- Kehilangan akibat relaksasi tendon P.C.
 Kehilangan relaksasi = $0.025 \times \text{Gaya prategang transfer}$
 = 13.958 kg
- Kehilangan akibat creep dan susut (*shrinkage*) beton
 Koefisien Creep = 2.0
 Koefisien Shrinkage = 15.3×10^{-5} (SNI T-12-2004)
 Tegangan pada beton setelah prategang:
 - Tegangan serat atas (pt) = 13.153 kg/cm²
 - Tegangan serat bawah (cpt) = 208.6 kg/cm²
 - Tegangan rata-rata (cp) = 114.7 kg/cm²
 Kehilangan akibat creep & shrinkage

$$\begin{aligned}
 &= \frac{n \times \text{creep koef} \times \text{cp} + \text{shrinkage koef} \times E_s}{\frac{1+n \times \text{cpt}}{\text{pt} \times \left(1 + \frac{\text{creep koef}}{2}\right)}} \\
 &= 1379.9 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 58.443 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gaya Prategang Efektif} &= 558300 - 13958 - 58443 \\
 &= 485.900 \text{ kg (total)} \\
 &= 113.0 \text{ kN / strands}
 \end{aligned}$$

6.4.3 Kontrol Tegangan dan Lendutan

Kontrol terhadap tegangan dan lendutan yang terjadi pada girder untuk memastikan bahwa elemen struktur bekerja dalam batas yang diizinkan sesuai ketentuan SNI. Pemeriksaan dilakukan baik pada kondisi transfer maupun kondisi layan, dengan mempertimbangkan pengaruh beban mati, beban hidup, serta gaya prategang efektif. Hasil kontrol ini menjadi dasar penilaian apakah penampang girder memenuhi syarat kekuatan dan kinerja yang dipersyaratkan.

A.) Kontrol Tegangan Transfer

Kontrol tegangan pada tahap transfer dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan yang timbul pada girder akibat gaya prategang awal (*transfer prestress*) tidak melampaui batas tegangan ijin sesuai ketentuan SNI T-12-2004. Analisis dilakukan dengan menghitung momen akibat beban mati awal (DL), gaya prategang efektif saat transfer. Tegangan yang dihitung mencakup tegangan pada serat atas dan serat bawah girder pada seluruh titik (POT 1–7). Hasil kontrol menunjukkan apakah nilai tegangan masih berada dalam batas aman tegangan ijin beton pada kondisi transfer. Kontrol tegangan transfer ditunjukkan pada tabel 6.14 berikut:

Tabel 6.14 Kontrol Tegangan Transfer

KETERANGAN	x (m)	POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7	
MOMEN DL (tm)	0.30	1.00	2.40	5.00	8.00	10.00	12.00		
MOMEN BAL (tm)		4.90	15.89	35.90	66.19	90.02	99.29	103.37	
MOMEN NET (tm)		-126.50	-147.26	-185.11	-242.37	-287.42	-304.94	-312.65	
P/A (kg/cm ²)		-121.60	-131.38	-149.20	-176.18	-197.40	-205.65	-209.28	
M/Wa (kg/cm ²)		105.43	105.43	105.43	105.43	105.43	105.43	105.43	
M/Wb (kg/cm ²)		-58.64	-63.36	-71.96	-84.97	-95.20	-99.18	-100.93	
M/Wb (kg/cm ²)		55.94	60.44	68.64	81.05	90.82	94.61	96.28	Teg. Ijin
TRANSFER STRESS	Top	46.79	42.07	33.47	20.46	10.23	6.25	4.50	-16.395
(kg/cm ²)	Bottom	161.37	165.87	174.07	186.48	196.25	200.04	201.71	253.053
									Δ = 51.34

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

B.) Kontrol Tegangan Service

Kontrol tegangan pada kondisi servis dilakukan untuk memverifikasi bahwa tegangan pada girder setelah jembatan berfungsi (*service load*) berada dalam batas aman. Perhitungan dilakukan berdasarkan kombinasi pembebanan sesuai SNI 1725:2016.

1.) Kombinasi Pembebanan Layan I

Kombinasi pembebanan layan I ditunjukkan pada tabel 6.15 berikut:

Tabel 6.15 Kombinasi Pembebanan Layan I

KETERANGAN	x (m)	POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7	
MOMEN GIRDER (tm)	0.30	1.00	2.40	5.00	8.00	10.00	12.00		
MOMEN BAL (tm)		12.27	39.75	89.83	165.62	225.24	248.42	258.63	
MOMEN NET GIRDER (tm)		-110.10	-128.17	-161.10	-210.94	-250.15	-265.40	-272.11	
MOMEN COMPOSITE (tm)		-97.83	-88.42	-71.27	-45.33	-24.91	-16.97	-13.48	
P/A (kg/cm ²)		13.06	42.33	95.80	177.15	242.03	268.02	281.21	
M/Wa (kg/cm ²)		91.76	91.76	91.76	91.76	91.76	91.76	91.76	
M/Wb (kg/cm ²)		-45.71	-37.88	-23.59	-1.93	15.21	21.97	25.14	
M/Wb (kg/cm ²)		40.86	27.23	2.36	-35.42	-65.42	-77.33	-83.13	Teg. Ijin
SERVICE STRESS	at Top SLAB	1.74	5.63	12.79	23.66	32.32	36.80	37.56	
(kg/cm ²)	GIRDER	Top	46.05	53.88	68.16	89.83	106.97	113.72	116.89
	Bottom	132.61	118.99	94.11	56.34	26.34	14.43	8.63	237.2374
									-36.6596

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

$$\text{Layan I} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB} + \text{EW} + \text{ET}$$

2.) Kombinasi Pembebanan Layan III

Kombinasi pembebanan layan III ditunjukkan pada tabel 6.16 berikut:

Tabel 6.16 Kombinasi Pembebanan Layan III

KETERANGAN	POT 1	POT 2	POT 3	POT 4	POT 5	POT 6	POT 7
x (m)	0.30	1.00	2.40	5.00	8.00	10.00	12.80
MOMEN GIRDER (tm)	12.27	39.75	89.83	165.62	225.24	248.42	258.63
MOMEN BAL (tm)	-110.10	-128.17	-161.10	-210.94	-250.15	-265.40	-272.11
MOMEN NET GIRDER (tm)	-97.83	-88.42	-71.27	-45.33	-24.91	-16.97	-13.48
MOMEN COMPOSITE (tm)	10.49	34.01	76.96	142.35	194.55	215.50	226.24
P/A (kg/cm ²)	91.76	91.76	91.76	91.76	91.76	91.76	91.76
M/Wa (kg/cm ²)	-46.00	-38.82	-25.71	-5.84	9.87	16.06	18.95
M/Wb (kg/cm ²)	41.67	29.88	8.34	-24.37	-50.34	-60.65	-65.67
SERVICE STRESS at Top SLAB (kg/cm ²)	1.74	5.65	12.79	23.66	32.32	35.80	37.56
GIRDER	Top	45.76	52.94	66.04	85.91	101.63	110.71
	Bottom	133.43	121.63	100.10	67.39	41.42	26.09
							-36.6596

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

$$\text{Layan III} = \text{MS} + \text{MA} + 0.8\text{TD} + 0.8\text{TB} + \text{ET}$$

C.) Rekapitulasi Hasil Kontrol Tegangan

Berikut rekapitulasi hasil kontrol tegangan yang ditunjukkan pada tabel 6.17.

Tabel 6.17 Rekapitulasi Hasil Kontrol Tegangan

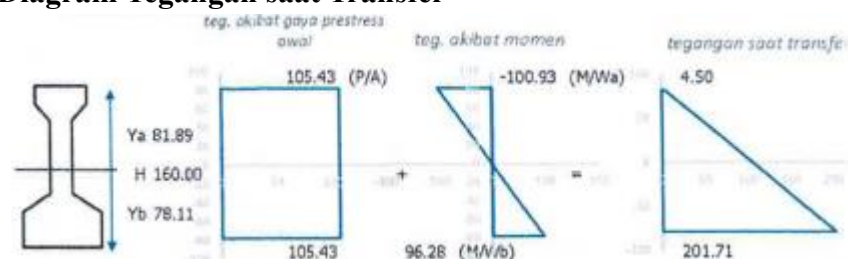
NO	URAIAN	GIRDER	STRESS	TEGANGAN IJIN	KETERANGAN
1	KONDISI AWAL	Top	4.50	-16.39	OK
		Bottom	201.71	253.05	OK
2	KONDISI SERVICE PEMBEBANAN LAYAN I	Top	116.89	237.24	OK
		Bottom	8.63	-36.66	OK
	PEMBEBANAN LAYAN III	Top	110.71	237.24	OK
		Bottom	26.09	-36.66	OK

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Berdasarkan tabel 6.17 diatas hasil evaluasi tegangan pada kondisi awal (*initial/transfer*), tegangan pada girder baik di serat atas maupun serat bawah tercatat dalam batas aman dan memenuhi kriteria desain. Sementara itu, pada kondisi layan, baik pada pembebanan layan I maupun pembebanan layan III, seluruh nilai tegangan tetap berada di bawah batas tegangan ijin. Hal ini menunjukkan bahwa struktur girder telah direncanakan secara memadai untuk menahan kombinasi beban selama tahap konstruksi maupun tahap operasional. Dengan ini, girder memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan struktur sesuai standar perencanaan yang berlaku.

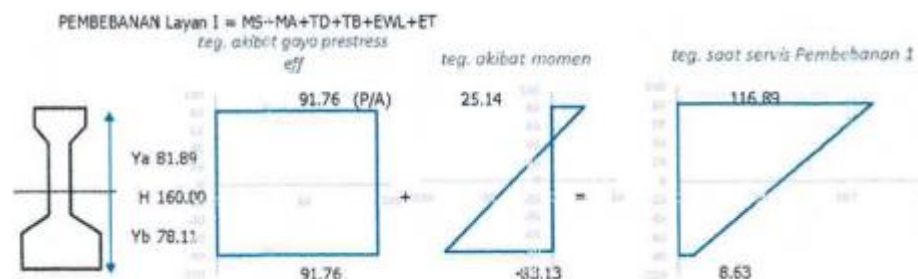
D.) Diagram Tegangan

1.) Diagram Tegangan saat Transfer

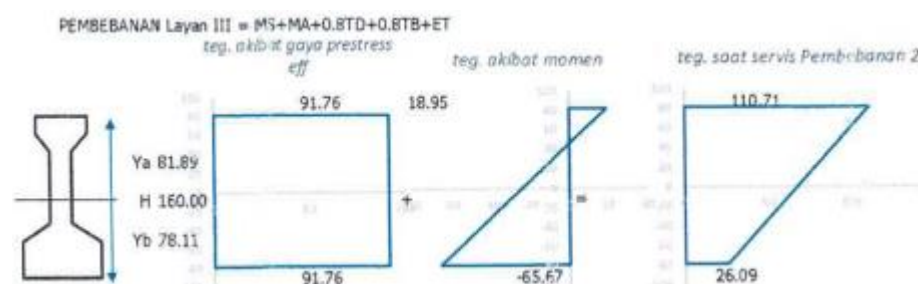


Gambar 6.26 Diagram Tegangan Saat Transfer
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

1.) Diagram Saat Service



Gambar 6.27 Diagram Tegangan Saat Pembebanan Layan I
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)



Gambar 6.28 Diagram Tegangan Saat Pembebanan Layan III
Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

E.) Kontrol Lendutan

Kontrol lendutan dilakukan untuk memastikan bahwa lendutan total girder PCI baik pada kondisi awal (*release*), *erection*, maupun kondisi akhir setelah komposit memenuhi persyaratan SNI dan tidak menyebabkan gangguan layanan atau ketidak-amanan struktur. Analisis lendutan dilakukan dalam dua tahap utama, yaitu pada kondisi Non-Komposit (girder saja) dan Komposit (girder yang telah bekerja bersama slab dan lapisan aspal). Selain itu, dilakukan juga evaluasi terhadap perkembangan lendutan pada tiga tahap waktu serta prediksi lendutan jangka panjang menggunakan metode PCI Multiplier. Seluruh hasil perhitungan disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 6.18 Kontrol Lendutan Girder

Jenis Beban	DL	PT	DL+PT	ADL	TDL+PT
Deflection (cm)	1.17	-3.815	-2.64	1.76	-0.88
Span/Deflection	2130	-655	-947	1418	-2845

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Tabel 6.19 Kontrol Lendutan Komposit

Jenis Beban	Aspal ADL	TDL+PT	TDL+LL Creep	LL	TL+PT Creep
Deflection (cm)	0.14	-0.74	-2.23	1.14	-1.09
Span/Deflection	18504	-3363	-1121	2197	-2288

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Berikut rekapitulasi lendutan tahap *release* hingga *final* ditunjukkan pada tabel 6.20 berikut:

Tabel 6.20 Rekapitulasi Kontrol Lendutan

NO	LOAD	RELEASE CM	ERECTION CM	FINAL CM	ALLOWABLE L/800 CM	KETERANGAN
1	PRESTRESS	-3.815	-3.815			
2	BEAM	1.173	1.173			
		-2.641				MASIH CAMBER
3	ADL DECK		1.763			
			-0.879	-0.879		MASIH CAMBER
4	ADL ASPAL			0.135		
				-0.743		
	CREEP			-2.230		
5	LL			1.138		
				-1.09	3.13 OK	

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Pada kondisi *release*, girder mengalami camber awal sebesar 1.173 cm akibat gaya prategang. Nilai camber ini meningkat pada *erection* menjadi 1.763 cm karena redistribusi tegangan. Setelah seluruh beban bekerja pada kondisi final, camber berkurang menjadi -0.879 cm karena pengaruh beban mati (ADL deck dan aspal) serta creep yang memberikan kontribusi signifikan sebesar -2.230 cm. Beban hidup (LL) menambah defleksi turun pada kondisi akhir, namun masih dalam batas aman. Total lendutan akhir girder adalah -1.09 cm, masih jauh di bawah batas lendutan izin sebesar 3.13 cm (L/800). Hal ini menunjukkan bahwa girder aman secara struktural dan lendutan yang terjadi tidak berpotensi mengganggu kenyamanan maupun keamanan struktur.

Perhitungan long time deflection (PCI Multiplier)

Perhitungan long-time deflection menggunakan persamaan PCI Journal (1985):

a.) Pada kondisi erection (30 - 60 hari setelah casting)

$$\begin{aligned}\Delta l &= 1.85\Delta_{\text{beam}} + 1.80\Delta_{\text{prestress}} \\ &= -4.70 \text{ cm}\end{aligned}$$

b.) Pada kondisi final (60 - 100 hari setelah casting)

$$\begin{aligned}\Delta l &= 2.70\Delta_{\text{beam}} + 2.45\Delta_{\text{prestress}} \\ &= -6.18 \text{ cm}\end{aligned}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa defleksi jangka panjang meningkat cukup signifikan akibat creep, shrinkage, dan kehilangan prategang. Namun, nilai ini tidak digunakan sebagai dasar kontrol izin, namun sebagai prediksi perilaku jangka panjang girder. Nilai tersebut masih dalam batas wajar untuk girder prategang panjang 25,60 m.

F.) Kapasitas Momen

$$\beta_1 = 0.6752$$

Nilai β_1 ditentukan berdasarkan kuat tekan beton (f'_c) dengan ketentuan:

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & ; f'_c \leq 4000 \text{ psi} \\ 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 4000}{1000} \right) & ; 4000 < f'_c < 8000 \text{ psi} \\ 0.65 & ; f'_c \geq 8000 \text{ psi} \end{cases}$$

1.) Data Material dan Penampang

Kekuatan leleh baja prategang (fpy)

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

$$f_{py} = 17064.22 \text{ kg/cm}^2$$

Gaya Prategang (T)

$$T = A_{ps} \times f_{ps}$$

$$T = 724296.9 \text{ kg}$$

Jarak resultan gaya prategang ke serat tekan atas

$$c = 6.96505 \text{ cm}$$

Luas area blok tekan beton

$$a = \beta_1 \times c$$

$$a = 0.6752 \times 6.96505$$

$$a = 4.703 \text{ cm}$$

2.) Kapasitas Momen Nominal

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = 1129.45602 \text{ tm}$$

3.) Momen Ultimit (Mu)

Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk elemen lentur prategang:

$$\phi = 0.85$$

$$\text{Maka, } M_u = \phi M_n$$

$$M_u = 0.85 \times 1129.45602$$

$$M_u = 960.037 \text{ tm}$$

Nilai ini digunakan sebagai kapasitas ultimit balok girder.

Berikut tabel resume momen balok yang digunakan sebagai dasar pemberian faktor pengali pada setiap komponen beban sebelum dikombinasikan untuk mendapatkan momen ultimit rencana yang ditunjukkan pada tabel 6.21 berikut

Tabel 6.21 Resume Momen Balok

AKSI / BEBAN	FAKTOR BEBAN ULTIMIT		REFERENSI
A. Aksi Tetap			
Berat sendiri Balok	K-MS	1.2	TABEL 3 SNI 1725 - 2016
Beban Mati Tambahan	K-MA	2	TABEL 4 SNI 1725 - 2016
B. Aksi Transien			
Beban Lajur "D"	K-TD	1.8	TABEL 12 SNI 1725 - 2016
Gaya Rem	K-TB	1.8	TABEL 12 SNI 1725 - 2016
C. Aksi Lingkungan			
Pengaruh Temperatur	K-ET	1.2	TABEL 1 SNI 1725 - 2016
Beban Angin	K-EW	1.2	TABEL 1 SNI 1725 - 2016
Beban Gempa	K-EQ	1	TABEL 1 SNI 1725 - 2016

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Kombinasi momen ultimit ditunjukkan oleh tabel 6.22 berikut

Tabel 6.22 Kombinasi Momen Ultimit

Kombinasi	Kombinasi	Mu aktual	Mu Capacity	Safety Factor	Keterangan
1	Kombinasi Kuat I = 1.2MS+2MA+1.8TD+1.8TB+1.2ET	808.95	960.04	1.187	OK
2	Kombinasi Kuat V = 1.2MS+2MA+1.2EWL+1.2ET	374.03	960.04	2.567	OK
3	Kombinasi Ekstrem I = 1.2MS+2MA+0.5TD+0.5TB+EQ	559.09	960.04	1.717	OK

Sumber : PT Parama Karya Mandiri KSO (2025)

Berdasarkan tabel 6.21 diatas dapat diketahui bahwa

1. Kombinasi Kuat I menghasilkan Mu = 808.95 tm

Safety factor terhadap kapasitas momen:

$$\frac{\phi Mn}{Mu} > 1 = \frac{960.04}{808.95} = 1.187 \text{ (OK)}$$

2. Kombinasi Kuat V memberikan nilai Mu = 374.03 tm

$$\frac{\phi Mn}{Mu} > 1 = \frac{960.04}{374.03} = 2.567 \text{ (OK)}$$

3. Kombinasi Ekstrem menghasilkan Mu = 559.09 tm

$$\frac{\phi Mn}{Mu} > 1 = \frac{960.04}{559.09} = 1.717 \text{ (OK)}$$

Secara keseluruhan, seluruh kombinasi beban menghasilkan momen aktual lebih kecil dari kapasitas momen girder (960.04 tm). Hal ini menunjukkan bahwa girder PCI-I memiliki kekuatan lentur yang memadai untuk menahan kombinasi beban ultimit sesuai persyaratan SNI 1725:201