

ANALISIS LOSS OF PRESTRESS PCI GIRDER AKIBAT METODE POST TENSION SINGLE STRESSING PADA PROYEK JEMBATAN DAN JALAN X KARAWANG STA 0+225 – 0+300

(Analysis of Loss Of Prestress in PCI Girders Due to the Single-Stage Post-Tensioning Method in the X Bridge and Road Project, Karawang STA 0+225 – 0+300)

Robbi Fi Ardhi¹, Suprayogi¹, Okri Asfino Putra¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI, Indonesia

E-mail: robbifiardhi25@gmail.com

Diterima 24 Maret 2025, Disetujui 26 Mei 2025

ABSTRAK

Kehilangan gaya prategang (*loss of prestress*) pada *PCI girder* merupakan faktor penting yang memengaruhi kinerja jangka panjang struktur jembatan, sehingga perlu dianalisis secara menyeluruh untuk menjamin keamanan dan efisiensi desain. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode *post-tension single stressing* terhadap kehilangan gaya prategang pada *PCI girder* bentang 30,8 meter, dengan mengacu pada standar NAASRA (1976). Analisis mencakup faktor-faktor seperti gesekan ankur, pemendekan elastis, relaksasi tendon, dan gesekan sepanjang saluran kabel. Hasil menunjukkan bahwa kehilangan tegangan total mencapai 12% dari gaya awal, masih berada dalam batas toleransi standar (maksimal 15%). Kehilangan akibat gesekan ankur sebesar 3% dan relaksasi tendon menjadi penyumbang terbesar. Selain itu, gaya prategang menurun dari 9000 kN menjadi 8125 kN di tengah bentang akibat gesekan kabel. Pemendekan elastis juga menyumbang kehilangan signifikan sebesar 307,766 kN. Temuan ini menegaskan pentingnya pengendalian kualitas dalam pelaksanaan stressing, optimalisasi desain, serta pemilihan material tendon dengan relaksasi rendah. Rekomendasi strategis meliputi peningkatan teknik *grouting*, penggunaan tendon baja berkarakteristik stabil, dan monitoring berkala. Penelitian ini memberikan kontribusi awal dalam pengembangan sistem prategang yang andal dan tahan lama, serta mendorong perlunya validasi eksperimental dan numerik untuk memperkuat temuan.

Kata kunci: *Loss of prestress; PCI girder; Post-tension; Single stressing*

ABSTRACT

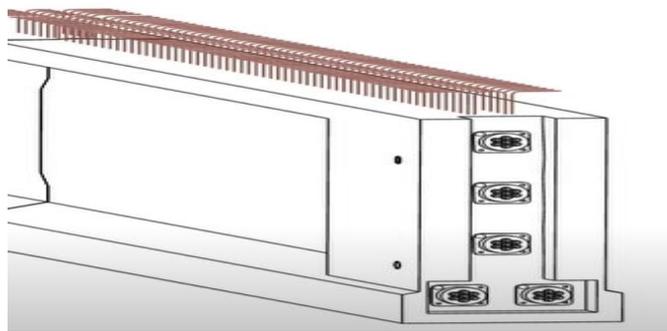
The loss of prestress in prestressed concrete I (PCI) girders is a critical factor influencing the long-term performance of bridge structures. A comprehensive analysis is therefore essential to ensure both structural safety and design efficiency. This study aims to evaluate the effectiveness of the post-tension single stressing method in mitigating prestress losses in a PCI girder with a span of 30.8 meters, based on the National Association of Australian State Road Authorities (NAASRA) Bridge Design Specification (1976). The analysis considers key contributing factors, including anchorage slip, elastic shortening, tendon relaxation, and friction along the duct. The results reveal that the total prestress loss reaches 12% of the initial prestressing force, which remains within the allowable limit prescribed by the standard (maximum 15%). Friction at the anchorage accounts for approximately 3% of the loss, while tendon relaxation is identified as the most significant contributor. Moreover, the prestressing force reduces from 9000 kN to 8125 kN at midspan due to cable friction. Elastic shortening also contributes a substantial loss of 307.766 kN. These findings underscore the importance of quality control during stressing procedures, optimized design practices, and the selection of low-relaxation tendon materials. Strategic recommendations include enhancing grouting techniques, utilizing tendons with stable mechanical properties, and implementing routine monitoring systems. This study provides a foundational contribution to the development of reliable and durable prestressing systems and highlights the need for further experimental and numerical validation to strengthen the findings.

Keywords: *Prestress loss; PCI girder; Post-tension; Single stressing*

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur vital yang berperan penting dalam mendukung konektivitas dan mobilitas, khususnya di wilayah dengan intensitas lalu lintas tinggi. Dalam perancangannya, pemilihan sistem struktur yang tepat menjadi aspek krusial untuk memastikan keamanan dan daya tahan jembatan terhadap beban lalu lintas serta pengaruh lingkungan. Salah satu sistem struktur mengakibatkan

penurunan performa struktural, berkurangnya kekakuan, serta penurunan umur layan jembatan. Berbagai studi menunjukkan bahwa total kehilangan tegangan prategang pada girder dapat mencapai 15–30% dari tegangan awal yang diaplikasikan, bergantung pada kualitas bahan, metode stressing, dan kondisi lingkungan [2]–[4]. Sebagai contoh, penelitian oleh Purwanto menunjukkan kehilangan tegangan sebesar 21,7% pada PCI girder dengan metode *post-tension* [3], sedangkan studi oleh Triyono mencatat kehilangan hingga 26% akibat kombinasi relaksasi tendon dan penyusutan beton [5]. Penelitian lain oleh Rachman menunjukkan bahwa pada lingkungan tropis, kehilangan tegangan dapat meningkat hingga 30% karena pengaruh kelembaban dan temperatur ekstrem [6].



Gambar 1. Ilustrasi model PCI Girder

Kehilangan tegangan pada *PCI girder* dapat berpengaruh langsung terhadap keamanan dan umur layan jembatan. Di Indonesia, sistem *PCI girder* banyak digunakan dalam pembangunan jembatan karena kemampuannya dalam menahan beban tarik. Namun, penelitian terkait dampak kehilangan tegangan prategang terhadap performa jembatan masih terbatas, terutama yang mempertimbangkan faktor lingkungan lokal. Jika tidak ditangani dengan baik, kehilangan tegangan ini dapat mempercepat kerusakan struktural, menyebabkan deformasi, dan menurunkan daya tahan jembatan dalam menghadapi beban lalu lintas yang tinggi. Pentingnya penelitian ini terletak pada upaya untuk memahami faktor-faktor yang memengaruhi kehilangan tegangan prategang serta dampaknya terhadap kinerja jembatan, sehingga dapat diperoleh solusi yang lebih tepat dalam perancangan jembatan yang lebih tahan lama dan aman. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan standar desain jembatan di Indonesia yang lebih efisien, dengan mempertimbangkan aspek teknis dan kondisi lingkungan yang ada [7].

Secara teoritis, kehilangan tegangan pada *PCI girder* dapat dijelaskan melalui teori elastisitas dalam mekanika material, yang menguraikan bagaimana penyusutan dan rangkai beton berkontribusi terhadap penurunan

yang banyak digunakan di Indonesia adalah *Precast Prestressed Concrete I (PCI) girder*, yang memiliki keunggulan dalam menahan gaya tarik akibat lentur dan efisiensi dalam pelaksanaan konstruksi [1].

Namun, struktur PCI girder tidak terlepas dari tantangan teknis, salah satunya adalah kehilangan tegangan prategang (*loss of prestress*) yang terjadi seiring waktu. Kehilangan tegangan ini dapat

tegangan. Teori ini dikembangkan lebih lanjut dalam model perhitungan kehilangan tegangan jangka panjang, di mana model ini mengakomodasi perilaku viskoelastis beton dalam jangka panjang serta efek interaksi *tendon* dan *girder*. Pendekatan serupa dilakukan dengan mengadaptasi metode perancangan berdasarkan *Eurocode 2* untuk mengevaluasi efek kehilangan tegangan prategang akibat rangkai dan penyusutan. Selain itu, teori *time-dependent losses* menjelaskan bahwa kehilangan tegangan seiring waktu dipengaruhi oleh faktor lingkungan serta sifat viskoelastis material beton [8].

Kehilangan tegangan ini terjadi seiring waktu dan dapat memengaruhi performa serta durabilitas jembatan yang menggunakan sistem prategang [9]. Beberapa mekanisme yang terlibat dalam fenomena kehilangan tegangan pada PCI girder dapat dijelaskan melalui beberapa teori, yaitu sebagai berikut:

1. Relaksasi Baja Tendon

Relaksasi baja tendon terjadi pada tendon baja akibat penurunan internal tegangan setelah penerapan awal gaya prategang. Hal ini dapat terjadi karena baja memiliki sifat viskoelastis, yang berarti baja dapat mengalami penurunan tegangan meskipun gaya tetap dipertahankan. Relaksasi baja ini terjadi secara lambat dan dapat mempengaruhi tingkat prategang yang diterapkan pada girder. Proses ini diatur oleh hukum viskoelastisitas, yang menyatakan bahwa material mengalami deformasi seiring waktu ketika dikenai tegangan. Relaksasi ini mempengaruhi distribusi tegangan dalam tendon dan dapat mempercepat penurunan tegangan prategang jangka panjang [10].

2. Penyusutan dan Rangkai Beton

Penyusutan dan rangkai beton terjadi seiring waktu yang menyebabkan perubahan bentuk dan ukuran beton. Penyusutan mengacu pada penurunan volume beton akibat penguapan air yang terperangkap dalam pori-pori beton, sementara rangkai adalah perubahan bentuk beton yang terjadi akibat beban jangka panjang yang disebabkan oleh pengeringan dan penguapan air dalam campuran beton. Proses ini menyebabkan beton menyusut, yang pada gilirannya menyebabkan penurunan tegangan pada tendon. Sedangkan rangkai terjadi ketika beton mengalami deformasi plastis secara bertahap di bawah pengaruh beban yang berkelanjutan dan mempercepat penurunan tegangan prategang dengan merubah dimensi elemen struktur [11].

3. Efek Gesekan Tendon

Gesekan tendon terjadi di dalam ducting juga berkontribusi terhadap kehilangan tegangan. Gesekan antara tendon dan saluran menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata, dan sebagian besar gaya prategang hilang pada titik yang mengalami gesekan tinggi. Hal ini bisa menyebabkan penurunan tegangan

pada bagian tertentu dari girder yang akan mempengaruhi performa struktural [12].

4. Slip pada Angkur Tendon

Pada titik anchorage tendon, dapat terjadi pergeseran kecil pada tendon yang mengarah pada pengurangan tegangan. Slip pada angkur tendon ini dapat mengurangi efektivitas gaya prategang pada girder, yang berimbas pada penurunan kekuatan struktural dan umur layan jembatan. Slip ini biasanya terjadi karena pengikatan tendon yang tidak sempurna atau pemilihan angkur yang tidak tepat. Pengaruhnya terhadap tegangan sangat signifikan, khususnya pada girder dengan bentang panjang yang diterapkan pada jembatan [13].

Kehilangan tegangan prategang yang tidak terkontrol dapat menyebabkan penurunan kekakuan struktur, meningkatkan risiko retak, serta mempercepat degradasi girder dalam jangka panjang. Hal ini terbukti pada studi kasus jembatan dan jalan X Karawang, di mana ditemukan penurunan tegangan prategang yang menyebabkan deformasi dan berkurangnya umur layan struktur. Kehilangan tegangan dapat diperkirakan menggunakan pendekatan numerik untuk memperkirakan kehilangan tegangan pada balok beton prategang berkekuatan tinggi, menyoroti pentingnya sifat viskoelastis material dalam desain. Sementara itu, kehilangan tegangan prategang melalui informasi modal, diidentifikasi bahwa faktor lingkungan dan beban berulang memiliki dampak signifikan terhadap degradasi struktur. Oleh karena itu, pemahaman terhadap mekanisme kehilangan tegangan prategang menjadi krusial dalam memastikan keandalan jembatan dalam jangka panjang [14].

Metode *post-tension single stressing girder* sering diterapkan dalam konstruksi jembatan di Indonesia. Metode ini memungkinkan distribusi tegangan yang lebih merata dibandingkan sistem prategang konvensional. Namun, metode ini juga memiliki keterbatasan dalam optimalisasi distribusi gaya prategang, terutama pada bentang panjang, sehingga masih berisiko mengalami kehilangan tegangan signifikan. Studi oleh Warner telah mengusulkan pendekatan berbasis desain dan material untuk mengurangi dampak kehilangan tegangan, seperti peningkatan mutu beton dan optimalisasi konfigurasi tendon [13]. Sejumlah standar nasional dan internasional telah mengatur *loss of prestress pada PCI girder*. SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan menjadi acuan utama dalam menentukan beban dan kehilangan tegangan dalam desain jembatan. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* juga memberikan pendekatan berbasis faktor pembebanan dalam menghitung kehilangan tegangan prategang. Selain itu, *NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities)* menyediakan metode analisis berbasis data empiris serta kondisi lingkungan yang mempengaruhi kinerja struktur [15], [16], [17], [18], [19].

Dalam praktik konstruksi di Indonesia, implementasi sistem PCI girder dengan metode *post-tension single stressing* belum sepenuhnya memperhatikan kerentanan terhadap kehilangan tegangan. Studi kasus pada proyek Jembatan dan Jalan X Karawang (STA 0+225 – STA 0+300) menunjukkan indikasi deformasi yang signifikan dan penurunan kapasitas struktural, yang mengarah pada dugaan tingginya kehilangan tegangan prategang. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi lebih lanjut

mekanisme kehilangan tegangan serta mencari solusi teknis yang dapat mengoptimalkan umur layan dan keandalan jembatan. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah tingginya kehilangan tegangan prategang pada PCI girder bentang 30,8 meter yang berpotensi menurunkan performa struktural jembatan dalam jangka panjang. Penelitian ini difokuskan untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan penyebab *loss of prestress* dalam kondisi lingkungan Indonesia, mengevaluasi pengaruh metode *post-tension single stressing* terhadap distribusi tegangan, serta merumuskan solusi teknis untuk mitigasi kehilangan tegangan pada PCI girder.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami mekanisme kehilangan tegangan pada PCI girder dan bagaimana metode *stressing* mempengaruhi distribusi tegangan serta performa jembatan dalam jangka panjang. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kehilangan tegangan yang relevan dengan kondisi di Indonesia, serta mencari solusi teknis untuk mengurangi dampaknya dengan studi kasus pada *PCI girder* bentang 30,8 meter dalam proyek jembatan dan jalan X Karawang (STA 0+225 – STA 0+300). Tujuan utama penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi faktor penyebab utama kehilangan tegangan prategang pada PCI girder, dengan mempertimbangkan faktor-faktor lingkungan lokal Indonesia.
2. Menganalisis pengaruh metode *post-tension single stressing* terhadap distribusi tegangan dan kinerja struktural *PCI girder* pada jembatan dengan bentang 30,8 meter.
3. Mengevaluasi solusi teknis yang dapat diterapkan untuk meminimalkan dampak kehilangan tegangan pada performa jembatan, guna meningkatkan daya tahan dan umur layan jembatan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi industri konstruksi, khususnya dalam perancangan jembatan beton prategang di Indonesia. Implikasi dari studi ini meliputi peningkatan keandalan desain jembatan prategang dalam menghadapi faktor lingkungan lokal, optimasi metode *stressing* untuk meningkatkan umur layan jembatan, serta penyusunan rekomendasi teknis yang dapat diadopsi dalam standar nasional untuk desain jembatan beton prategang.

METODOLOGI

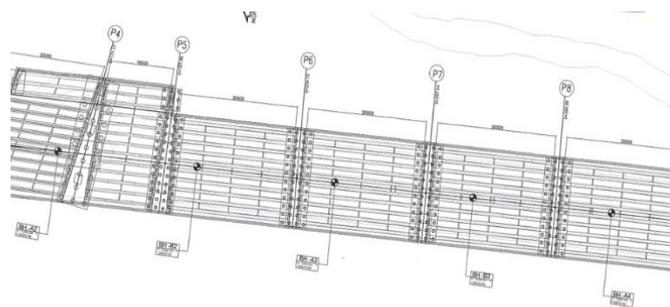
A. Pendekatan Penelitian

1. Desain Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan pendekatan kuantitatif dan analitis teknis berbasis data sekunder, dengan metode studi kasus untuk mengevaluasi faktor *loss of prestress* pada *PCI girder* dengan bentang 30,8 meter di proyek jembatan dan jalan X Karawang (STA 0+225 – STA 0+300). Pendekatan ini memungkinkan analisis empiris berbasis data terhadap mekanisme kehilangan tegangan pada PCI girder langsung di lapangan berdasarkan perhitungan analitis variabel utama.

2. Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis kehilangan tegangan pada *PCI girder* dengan bentang 30,8 meter yang digunakan dalam proyek jembatan dan jalan X Karawang (STA 0+225 – STA 0+300). Objek ini dipilih karena memiliki karakteristik umum dalam proyek infrastruktur serta mengalami *loss of prestress* signifikan akibat berbagai faktor, seperti relaksasi tendon baja, gesekan tendon dengan ducting, pemendekan elastis girder, penyusutan dan rangkai beton, serta slip pada angkur tendon. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan empiris dan analitis, memanfaatkan data sekunder proyek dan standar desain. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai mekanisme kehilangan tegangan pada struktur *PCI girder*.



Gambar 2. Tampak atas PCI girder

3. Variabel penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1, yang menyajikan parameter utama serta keterkaitannya dengan analisis yang dilakukan.

Tabel 1. Definisi operasional variabel penelitian

Kode	Variabel	Definisi Operasional	Referensi
X1	Loss of prestress akibat gesekan angkur	Kehilangan tegangan yang akibat gesekan tendon dengan angkur pada saat penarikan, yang menyebabkan distribusi gaya prategang tidak seragam [15].	NAASRA Section:6 Prestressed Concrete Design (1976)
X2	Loss of prestress akibat gesekan kabel	Kehilangan tegangan oleh gesekan kabel prategang dengan saluran selama penarikan.	NAASRA Section:6 Prestressed Concrete Design (1976)
X3	Loss of prestress akibat pemendekan elastis	Penurunan tegangan akibat pemendekan elastis beton saat kabel prategang ditarik dan dikunci, yang menyebabkan	SNI 2847:2019, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2020)

Kode	Variabel	Definisi Operasional	Referensi
X4	Loss of prestress akibat pengangkutan	redistribusi tegangan. Kehilangan tegangan yang terjadi saat gaya prategang dikunci pada angkur akibat slip dari angkur setelah penarikan tendon.	NAASRA Section:6 Prestressed Concrete Design (1976)
X5	Loss of prestress akibat susut	Kehilangan tegangan akibat penurunan volume beton oleh penguapan air bebas dalam waktu tertentu [15].	NAASRA Section:6 Prestressed Concrete Design (1976)
X6	Loss of prestress akibat pengaruh rayapan	Kehilangan tegangan akibat deformasi beton secara bertahap dalam jangka panjang di bawah tegangan tetap, yang menyebabkan relaksasi tegangan [15].	NAASRA Section:6 Prestressed Concrete Design (1976)

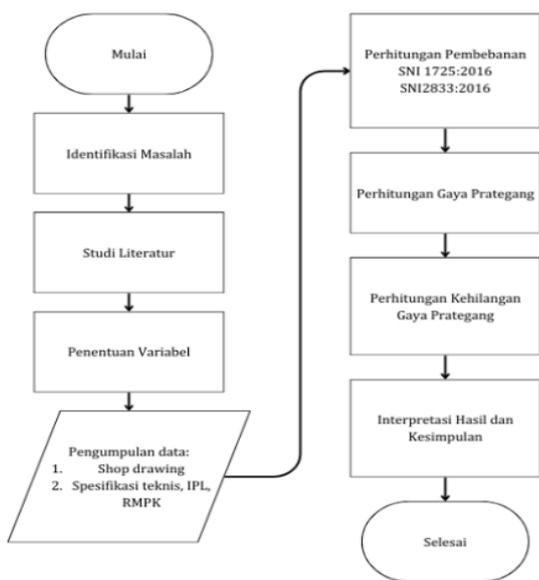
B. Detail Tahapan Penelitian dan Bagan Alir

Penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan untuk memastikan analisis terhadap fenomena *loss of prestress* pada *PCI girder* mencakup langkah sistematis dalam pengumpulan data dan analisis untuk menjawab permasalahan. Berikut adalah tahapan penelitian yang dilakukan:

- a. Identifikasi Masalah dan Studi Literatur
 - i. Mengidentifikasi *loss of prestress* sebagai permasalahan utama dalam desain *PCI girder*.
 - ii. Melakukan studi literatur dari berbagai sumber, termasuk standar desain (SNI 2833:2016, SNI 1725:2016, AASHTO LRFD, NAASRA) serta penelitian terdahulu terkait mekanisme kehilangan tegangan prategang.
 - iii. Menyusun kerangka teori berdasarkan referensi.
- b. Pengumpulan Data

Mengumpulkan data sekunder yang dibutuhkan dari dokumen teknis proyek, seperti gambar desain, spesifikasi material, standar, serta catatan pelaksanaan metode *stressing*.
- c. Analisis Data
 - i. Analisis kehilangan tegangan prategang: Menghitung besaran kehilangan tegangan total berdasarkan data pengukuran dan membandingkannya dengan nilai model teoritis.
 - ii. Evaluasi metode *post-tension single stressing* Menganalisis distribusi tegangan pada tendon sebelum dan setelah *stressing*, serta membandingkan hasil perhitungan dengan perhitungan teoretis dan standar (AASHTO, SNI, dan *PCI Bridge Design Manual*).

- d. Pembahasan dan Interpretasi Hasil
 - i. Menginterpretasikan hasil analisis kehilangan tegangan.
 - ii. Mengevaluasi dampak kehilangan tegangan terhadap risiko deformasi, retak, dan penurunan kapasitas struktur.
 - iii. Menyusun rekomendasi teknis terkait optimalisasi metode *stressing* dan mitigasi kehilangan tegangan pada *PCI girder* dalam kondisi lingkungan Indonesia.
- e. Kesimpulan dan Rekomendasi
 - i. Menyimpulkan faktor *loss of prestress*, efektivitas *stressing*, serta implikasi kehilangan tegangan terhadap performa jembatan.
 - ii. Memberikan rekomendasi teknis *PCI girder* guna meminimalkan dampak *loss of prestress*.
 - iii. Menyusun arah penelitian lanjutan yang dapat memperdalam analisis kehilangan tegangan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

Tahapan penelitian ini disajikan secara sistematis dalam Gambar 3, yang menggambarkan alur penelitian mulai dari identifikasi masalah hingga kesimpulan guna memvisualisasi langkah-langkah penelitian yang dilakukan, termasuk pengumpulan data, analisis kehilangan tegangan, evaluasi metode *stressing*, serta interpretasi hasil yang digunakan sebagai dasar dalam menyusun kesimpulan dan rekomendasi.

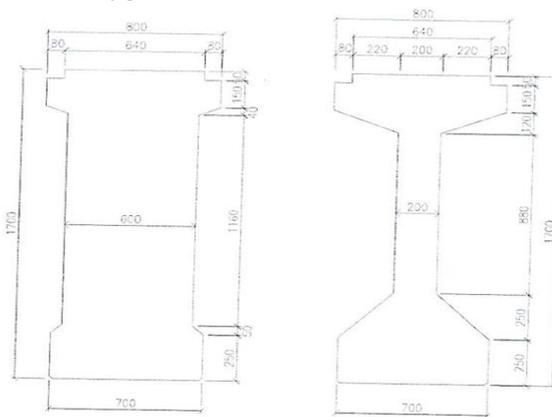
- C. Identifikasi dan Metode Pengumpulan Data Penelitian

Penelitian ini berfokus pada analisis *stressing girder* dengan bentang 30,8 meter pada proyek jalan X Karawang. Penelitian ini menggunakan data sekunder yang didapatkan dari pengajuan kepada proyek X terkait data yang dibutuhkan dalam melakukan analisis. Berikut adalah data yang digunakan dalam penelitian, yaitu:

- 1. Data *shop drawing*

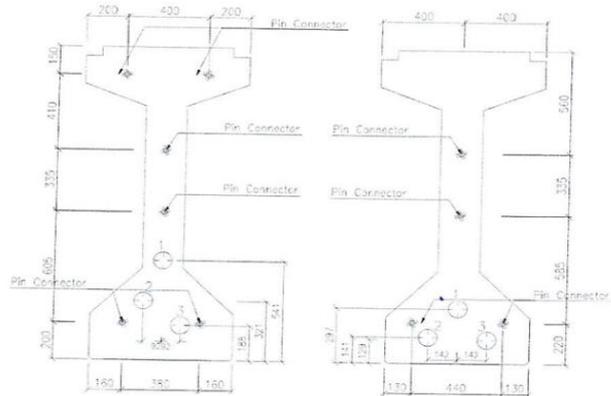
Merupakan data gambar teknik yang berisi dimensi dan detail desain jembatan yang digunakan untuk menganalisis *loss of prestress* pada *PCI Girder* untuk dilakukan analisis berdasarkan spesifikasi *NAASRA*. Data ini menjadi acuan dalam perhitungan pembebanan

untuk *loss of prestress*.



Gambar 4. Dimensi *PCI Girder* 30,8 m

Data selanjutnya yang dianalisis adalah jarak tendon pada *PCI girder*, dimana jarak ini berpengaruh terhadap distribusi tegangan dan besarnya kehilangan tegangan. Oleh karena itu, jarak tendon harus direncanakan secara sistematis untuk memastikan kesesuaian terhadap performa struktur. Dalam analisis ini, konfigurasi jarak tendon pada tumpuan dan tengah bentang menjadi faktor penting yang mempengaruhi distribusi tegangan serta kehilangan tegangan prategang.



Gambar 5. Dimensi profil tendon *PCI Girder* 30,8 m

Detail mengenai konfigurasi ini disajikan pada tabel 2, yang menggambarkan variasi jarak tendon berdasarkan posisi dalam bentang.

Tabel 2. Jarak Tendon

No Tendon	Profil tendon			
	Tumpuan		Tengah Bentang	
	x (mm)	Y (mm)	x (mm)	Y (mm)
1	0	1000	0	260
2	0	650	-150	120
3	0	300	150	120

- 2. Spesifikasi teknis, RMPK (Rencana Mutu Pekerjaan Konstruksi) dan IPL (Izin pelaksanaan Pekerjaan)

Berisi informasi terkait spesifikasi material yang digunakan dalam proyek, termasuk jenis dan mutu material yang digunakan. Dokumen ini juga mencakup standar aturan yang berlaku, seperti SNI, yang

digunakan untuk mendukung analisis *loss of prestress*.

D. Responden Penelitian

Penelitian ini tidak melibatkan responden dalam bentuk wawancara atau kuesioner karena menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis studi kasus dan analisis data sekunder proyek. Data yang digunakan berasal dari dokumen teknis proyek, termasuk gambar kerja (shop drawing), spesifikasi material, serta laporan mutu dan rencana pelaksanaan konstruksi dengan acuan standar desain NAASRA 1976 dan SNI yang digunakan.

E. Metode Analisis Data

Teknik analisis data dilaksanakan secara perhitungan manual yang berpedoman pada *NAASRA bridge design spesification* 1976. Analalisis ini dilaksanakan pada rencana desain *PCI girder* pada jembatan beton prategang proyek X karawang STA 0+225 – 300.

1. Kehilangan tegangan akibat gesekan angkur

Kehilangan tegangan akibat gesekan angkur terjadi ketika tendon mengalami pergerakan angkur setelah gaya prategang diterapkan. Kehilangan ini bergantung pada panjang tendon yang efektif dan besar slip yang terjadi pada angkur. Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung kehilangan tegangan akibat gesekan angkur adalah:

$$P_0 = 97\% \times P_{jf} \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

- P_{jf} = Gaya *jacking force*
- P_0 = Gaya setelah kehilangan gaya gesekan angkur

2. Kehilangan tegangan akibat gesekan kabel

Kehilangan tegangan akibat gesekan kabel dalam girder beton prategang terjadi karena adanya gaya gesek antara tendon prategang. Gesekan ini mengurangi tegangan yang sampai ke ujung pengangkuran, kehilangan tegangan akibat gesekan kabel dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_x = P_0 \times e^{-\mu \times (\alpha + (\beta \times L_x))} \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

- α = Perubahan sudut lintasan tendon
- μ = Koefisien gesek
- β = Koefisien *wooble*
- e = Bilangan natural (2,7183)
- P_x = *loss of prestress* akibat gesekan kabel

3. Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis

Loss of prestress ini terjadi ketika beton mengalami deformasi segera setelah kabel prategang ditarik dan ditransfer ke struktur. Pemendekan ini menyebabkan kehilangan sebagian tegangan dalam tendon prategang secara bertahap (*post-tensioning*). Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_e = \frac{A_t}{A} \times \left(1 + e_s^2 / i^2 \right) \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_{pi} = \frac{n_s \times P_{bs}}{A_t} \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta\sigma_{pe'} = \frac{\sigma_{pi} \times n \times K_e}{1 + (n \times K_e)} \dots\dots\dots(5)$$

$$\sigma_{bt} = \frac{\Delta\sigma_{pe'}}{n} - \frac{M_{Balok} \times e_s}{I_x} \dots\dots\dots(6)$$

$$\Delta\sigma_{pe} = 0,5 \times n \times \sigma_{bt} \dots\dots\dots(7)$$

$$\Delta P_e = \Delta\sigma_{pe} \times A_t \dots\dots\dots(8)$$

dimana:

- σ_{pi} = Tegangan *strand* sebelum *loss of prestress*
- $\Delta\sigma_{pe'}$ = Kehilangan tegangan baja oleh beban sendiri
- σ_{bt} = Tegangan beton oleh pengaruh gaya prategang
- $\Delta\sigma_{pe}$ = Kehilangan tegangan baja oleh regangan elastik
- ΔP_e = *Loss of prestress* akibat pemendekan elastik

4. Kehilangan tegangan akibat pengangkuran

Kehilangan tegangan akibat pengangkuran terjadi pada sistem *post-tensioning*, yaitu saat kabel prategang ditarik dan ditahan sistem pengangkuran. Setelah penarikan, tendon mengalami sedikit kehilangan tegangan karena slip pada sistem angkur. Kehilangan tegangan ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M = \frac{P_0 - P_x}{L_x} = \frac{8730 - 8124,506}{15,4} \dots\dots\dots(9)$$

$$L_{max} = \sqrt{\frac{\Delta L \times E_s \times A_t}{m}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta P = 2 \times L_{max} \times m \dots\dots\dots(11)$$

$$P'_{max} = P_0 - \Delta P / 2 \dots\dots\dots(12)$$

$$P_{max} = P'_{max} - \Delta P_e \dots\dots\dots(13)$$

dimana:

- m = Kemiringan diagram gaya
- L_{max} = Jarak pengaruh kritis angkur dari ujung
- Δp = *Loss of prestress* akibat angkur

5. Kehilangan tegangan akibat susut

Kehilangan tegangan akibat susut beton terjadi karena beton mengalami penurunan volume secara bertahap setelah proses hidrasi semen. Hal ini menyebabkan beton menyusut dan menarik kembali tendon prategang, yang mengurangi tegangan dalam kabel prategang.

$$e_m = 2 \times A / K \dots\dots\dots(14)$$

k_e → Kurva 6.2 NAASRA

$$k_p = \frac{100}{100 + (20 \times 0,71)} \dots\dots\dots(15)$$

$$\Delta\epsilon_{su} = \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \dots\dots\dots(16)$$

$$\sigma_{sh} = \Delta\epsilon_{su} \times E_s \dots\dots\dots(17)$$

dimana:

- ϵ_b = Regangan dasar susut
- p = Presentase luas tulangan pada luas balok
- σ_{sh} = Tegangan susut

6. Kehilangan tegangan akibat pengaruh rayapan

Rayapan beton adalah deformasi bertahap yang terjadi pada beton akibat beban jangka panjang, termasuk gaya prategang. Seiring waktu, beton mengalami pemendekan tambahan akibat rayapan, yang menyebabkan kehilangan tegangan dalam tendon prategang karena gaya yang ditransfer berkurang. Perhitungan ini didasarkan pada tabel 6.4 NAASRA untuk mendapatkan nilai koefisien [11].

$$P_i = P_X - \Delta P_e \dots\dots\dots(18)$$

$$f_a = -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok}}{W_a} \dots\dots\dots(19)$$

$$f_b = -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e_s}{W_b} - \frac{M_{balok}}{W_b} \dots\dots\dots(20)$$

$k_c ; k_d ; k_{tn} \rightarrow$ kurva 6.4 NAASRA

$$\epsilon_{cr} = \frac{f_c}{E_{balok}} \times k_b \times k_c \times k_d \times K_e \times k_{tn} \dots\dots\dots(21)$$

$$\sigma_{cr} = \epsilon_{cr} \times E_s \dots\dots\dots(22)$$

$$\Delta\sigma_d = \sigma_{sh} + \sigma_{cr} \dots\dots\dots(23)$$

$$\sigma_{pi} = \frac{P_i}{A_t} \dots\dots\dots(24)$$

$$\sigma_r = X.c. (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_d) \dots\dots\dots(25)$$

$$\Delta P = (\sigma_r + \Delta\sigma_d) \times A_t \dots\dots\dots(26)$$

$$P_{eff} = P_i - \Delta P \dots\dots\dots(27)$$

- dimana:
- P_i = P initial tengah bentang
 - f_a = Tegangan serat atas
 - f_b = Tegangan serat bawah
 - P_{eff} = Gaya efektif tengah bentang
 - σ_s = Tegangan ijin tendon pasca tarik
 - f_p = Tegangan tendon pasca tarik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam analisis kehilangan tegangan pada kabel prategang, berbagai faktor yang mempengaruhi distribusi gaya sepanjang tendon telah diperhitungkan, termasuk gesekan angkur, gesekan kabel, pemendekan elastis, pengankuran, dan relaksasi tendon. Setiap mekanisme kehilangan tegangan ini memiliki dampak yang bervariasi terhadap efektivitas sistem prategang, yang pada akhirnya menentukan tingkat tegangan efektif setelah semua kehilangan diperhitungkan. Mengacu pada spesifikasi NAASRA 1976, batas kehilangan tegangan yang diizinkan 15% dari gaya awal. Oleh karena itu, perhitungan ini bertujuan untuk memastikan nilai kehilangan tegangan yang terjadi masih dalam batas yang diperbolehkan.

A. Kombinasi pembebanan

Kombinasi pembebanan ini digunakan untuk memastikan bahwa setelah terjadi *loss of prestress*, struktur tetap mampu menahan beban layan dan beban ultimate sesuai dengan standar desain, seperti SNI 1725:2016 dan SNI 2833:2016. Kombinasi pembebanan yang digunakan dalam analisis tercantum pada tabel 3.

Tabel 3. Kombinasi Pembebanan

Kombinasi	Mu (kNm)
Kuat 1	16989.357
Kuat 2	16062.408
Kuat 3	12874.430
Kuat 4	12818.086
Kuat 5	12874.430
Ekstream 1	16083.819
Ekstream 2	13940.363
Layan 1	11675.101

Layan 2	12317.993
Layan 3	11159.307
Layan 4	9333.581

B. Kehilangan tegangan pada kabel

1. Akibat Gesekan Angkur (3% jacking force)

Kehilangan tegangan akibat gesekan angkur terjadi karena adanya deformasi lokal pada sistem penjangkaran saat gaya prategang diaplikasikan. Gesekan ini menyebabkan sebagian gaya prategang tidak tersalurkan sepenuhnya ke tendon, sehingga mengurangi efektivitas gaya awal yang diterapkan. Berdasarkan spesifikasi NAASRA 1976, kehilangan tegangan akibat gesekan angkur umumnya berkisar antara 2% hingga 5% dari gaya *jacking force* awal. Gesekan angkur menyebabkan kehilangan tegangan sekitar 3% dari gaya prategang awal.

$$P_{jf} = 9000$$

$$P_0 = 97\% \times P_{jf}$$

$$= 8730 \text{ kN}$$

Dalam konteks serupa, penelitian Chen dan Graybeal (2020) kehilangan tegangan akibat gesekan angkur diperhitungkan 2,5%–4% dalam *girder ultra high performance concrete (UHPC)*. [7]. Hasil perhitungan menunjukkan kehilangan tegangan akibat gesekan angkur sebesar 3% dari gaya *jacking force* awal, menghasilkan gaya prategang efektif 8730 kN dari 9000 kN atau berkisar 3%, maka nilai ini berada dalam rentang yang diperbolehkan.

2. Akibat Gesekan Kabel

Kehilangan tegangan akibat gesekan kabel terjadi karena interaksi antara tendon prategang dan saluran tendon sepanjang bentang struktur. Berdasarkan spesifikasi NAASRA 1976, kehilangan tegangan akibat gesekan kabel biasanya berkisar antara 5% hingga 15% dari gaya awal, tergantung pada panjang tendon dan sudut deviasi yang terjadi. Gesekan antara kabel dan saluran tendon mengurangi tegangan sepanjang bentang struktur [15].

$$\alpha_{AB} = \alpha_{BC}$$

$$= 5^\circ \rightarrow 0,089 \text{ rad}$$

$$\alpha = \alpha_{AB} + \alpha_{BC}$$

$$= 0,1746 \text{ rad}$$

$$\mu = 0,2$$

$$\beta = 0,012$$

$$e = 2,7183$$

Perhitungan kehilangan tegangan:

Tengah bentang ($L_x = 15,4 \text{ m}$)

$$P_x = P_0 \times e^{-\mu \times (\alpha + (\beta \times L_x))}$$

$$= 8730 \times 2,7183^{-0,2 \times (0,1746 + (0,012 \times 15,4))}$$

$$= 8124,506 \text{ kN}$$

Ujung bentang ($L_x = 30,8 \text{ m}$)

$$P_x = P_0 \times e^{-\mu \times (\alpha + (\beta \times L_x))}$$

$$= 8730 \times 2,7183^{-0,2 \times (0,1746 + (0,012 \times 30,8))}$$

$$= 7829,704 \text{ kN}$$

Gesekan yang terjadi antara tendon dengan angkur menyebabkan kehilangan gaya sebesar 3% dari gaya *jacking force* awal. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada tengah bentang, kehilangan tegangan mencapai 8124,51 kN, sedangkan pada ujung bentang mencapai 7829,70 kN. Hal ini menunjukkan bahwa

distribusi gaya prategang mengalami penurunan secara eksponensial sepanjang tendon akibat faktor gesekan. Hasil perhitungan ini menunjukkan kehilangan tegangan yang masih dalam batas yang diperbolehkan.

3. Akibat pemendekan elastis

Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis terjadi karena deformasi elastis pada struktur yang menerima gaya prategang. Saat gaya prategang diterapkan, balok mengalami pemendekan seiring redistribusi tegangan dalam material, yang menyebabkan berkurangnya tegangan tendon. Besarnya kehilangan tegangan ini dipengaruhi oleh modulus elastisitas material, geometri penampang, serta konfigurasi tendon. Sesuai spesifikasi NAASRA 1976, kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis berkisar antara 2% hingga 6% dari gaya awal prategang, sedangkan pada AASHTO LRFD 2020 berkisar 0,8%-1,8% dari gaya prategang awal [9].

Perhitungan kehilangan tegangan akibat pemendekan elastik

$$K_e = \frac{A_t}{A} \times \left(1 + \frac{e_s^2}{i^2} \right) = 0,016943$$

$$\sigma_{pi} = \frac{n_s \times P_{bs}}{A_t} = \frac{54 \times 187,32}{0,0053341} = 1896335 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{pe'} = \frac{\sigma_{pi} \times n \times K_e}{1 + (n \times K_e)} = \frac{1896335 \times 5,411 \times 0,016943}{1 + (5,411 \times 0,016943)} =$$

159244,45 kPa

$$\sigma_{bt} = \frac{\Delta\sigma_{pe'}}{n} - \frac{M_{Balok} \times e_s}{I_x} = 21327,172 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_{pe} = 0,5 \times n \times \sigma_{bt} = 57697,563 \text{ kPa}$$

$$\Delta P_e = \Delta\sigma_{pe} \times A_t = 307,766 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil analisis, kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis mencapai 307,77 kN. Kehilangan ini bergantung pada modulus elastisitas bahan serta geometri penampang girder. Dalam hal yang serupa oleh Bažant dan Baweja (1995) menunjukkan bahwa pemendekan elastis pada PCI girder berkisar 0,5-2% gaya awal, sehingga hasil perhitungan ini menunjukkan kehilangan yang masih dalam rentang izin [11].

4. Akibat Pengangkuran

Kehilangan tegangan akibat pengangkuran terjadi karena adanya slip kabel pada angkur saat gaya prategang diaplikasikan, sehingga deformasi terjadi di area angkur serta gesekan antara tendon dan sistem penjangkaran. Menurut spesifikasi NAASRA 1976, kehilangan tegangan akibat pengangkuran umumnya berada dalam rentang 3%-8% dari gaya awal prategang, sedangkan AASHTO LRFD 2020 menetapkan bahwa kehilangan akibat slip angkur umumnya berkisar antara 6%-10% dari gaya awal [9].

Tabel 4. Data Pengangkuran

Uraian	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang kabel masuk (2-7) mm	ΔL	0,005	M
Modulus elastisitas baja	E_{Baja}	193000000	kPa
Luas tampang tendon	A_t	0,00533412	m ²
Loss stress akibat gesekan angkur	P_0	8730	kN

Loss stress akibat gesekan kabel	P_x	8124,5057	kN
Jarak dari ujung bed ke tengah bentang	L_x	15,4	M

Perhitungan kehilangan tegangan akibat pengangkuran:

$$M = \frac{P_0 - P_x}{L_x} = \frac{8730 - 8124,506}{15,4} = \frac{8730 - 8124,506}{15,4} = 39,318 \text{ kN/m}$$

$$L_{max} = \sqrt{\frac{\Delta L \times E_s \times A_t}{m}} = 11,442 \text{ m}$$

$$\Delta P = 2 \times L_{max} \times m = 899,7456 \text{ kN}$$

$$P'_{max} = P_0 - \Delta P / 2 = 8280,1272 \text{ kN}$$

$$P_{max} = P'_{max} - \Delta P_e = 5980,6168 \text{ kN}$$

Dengan hasil, kehilangan gaya akibat pengangkuran mencapai 899,75 kN, atau kehilangan tegangan sekitar 10%, nilai ini sedikit di atas rentang standar, sehingga metode pengangkuran perlu diperiksa ulang untuk meminimalkan kehilangan tegangan.

5. Akibat relaksasi tendon

Relaksasi tendon terjadi akibat perubahan tegangan internal dalam kabel prategang seiring waktu. Kehilangan tegangan ini dihitung berdasarkan spesifikasi NAASRA Bridge Design dengan kondisi kelembaban 70%, air semen $w = 0,04$, kadar semen 4,5 kN/m³, sehingga didapat data sebagai berikut:

a. Pengaruh susut

Kehilangan tegangan akibat pengaruh susut terjadi karena berkurangnya volume beton seiring waktu akibat proses hidrasi semen dan evaporasi air campuran beton, sehingga menyebabkan penurunan regangan pada beton yang berdampak langsung pada pengurangan tegangan dalam tendon prategang. Besarnya kehilangan tegangan akibat susut dipengaruhi oleh faktor seperti rasio air-semen, kelembaban lingkungan, serta sifat material beton.

$$\epsilon_b = 0,0004 \rightarrow \text{tabel 6.4 NAASRA}$$

$$k_b = 0,91 \rightarrow \text{Kurva 6.1 NAASRA}$$

$$A = 0,7523 \text{ m}^2$$

$$K = 5,513 \text{ m}$$

$$e_m = 2 \times A / K = 0,273 \text{ m}$$

$$k_e = 0,725 \rightarrow \text{Kurva 6.2 NAASRA}$$

$$p = 0,71\%$$

$$k_p = \frac{100}{100 + (20 \times 0,71)} = 0,876$$

$$\Delta\epsilon_{su} = \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p = 0,0002311$$

$$\sigma_{sh} = \Delta\epsilon_{su} \times E_s = 44607,05 \text{ kPa}$$

b. Pengaruh rayapan

Kehilangan tegangan akibat pengaruh rayapan terjadi karena deformasi viskoelastis beton yang berlangsung secara bertahap di bawah beban tetap dalam jangka waktu panjang. Rayapan menyebabkan peningkatan regangan pada beton tanpa adanya peningkatan tegangan, yang pada akhirnya mengurangi efektivitas gaya prategang dalam tendon. Besarnya kehilangan tegangan akibat rayapan sangat dipengaruhi oleh tegangan awal beton, modulus elastisitas, serta kondisi lingkungan.

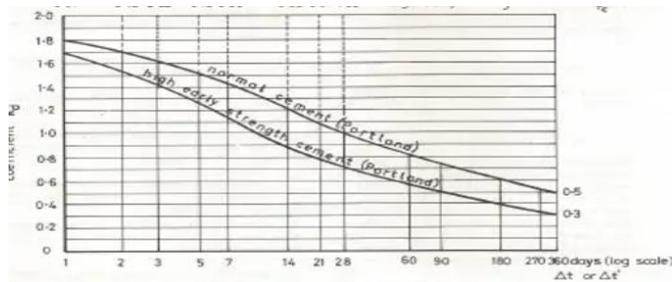
$$P_i = P_x - \Delta P_e$$

$$\begin{aligned}
 &= 7816,74 \text{ kN} \rightarrow 77\% \text{ UTS} \\
 f_a &= -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e_s}{W_a} - \frac{M_{balok}}{W_a} \\
 &= -5436,348 \text{ Kpa} \\
 f_b &= -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e_s}{W_b} - \frac{M_{balok}}{W_b} \\
 &= -17749,529 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Tabel 5. Nilai Koefisien k_c

Climatic Condition	Average Relative Humidity as a Percentage	k_c
Dry air Generally in the open air, and not subject to periods of prolonged high temperature or low humidity	<50	3,0
In vey humidity air, e.g. over water	>75	1,5
In Water	100	1,0

$k_c = 2,5 \rightarrow$ tabel 6.4 NAASRA



Gambar 6. Nilai Koefisien k_d

$$\begin{aligned}
 k_d &= 1,5 \rightarrow \text{kurva 6.4 NAASRA} \\
 k_{tn} &= 0,25 \rightarrow \text{kurva 6.4 NAASRA} \\
 f_c = f_b &= 17749,529 \text{ Kpa} \\
 \epsilon_{cr} &= \frac{f_c}{E_{balok}} \times k_b \times k_c \times k_d \times K_e \times k_{tn} \\
 &= 0,0001641 \\
 \sigma_{cr} &= \epsilon_{cr} \times E_s = 31680,385 \text{ Kpa} \\
 \Delta\sigma_d &= \sigma_{sh} + \sigma_{cr} = 76287,434 \text{ Kpa} \\
 \sigma_{pi} &= \frac{P_i}{A_t} = 1465422,6 \text{ Kpa}
 \end{aligned}$$

$X = 0 \rightarrow \sigma_{pi} < 50\% \text{ UTS}$
 $X = 1 \rightarrow \sigma_{pi} = 50\% \text{ UTS}$
 $X = 2 \rightarrow \sigma_{pi} = 70\% \text{ UTS}$

Maka diambil nilai $X = 2,143$; $c = 2,98\%$

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= X \cdot c \cdot (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_d) = 88845,962 \text{ Kpa} \\
 \Delta P &= (\sigma_r + \Delta\sigma_d) \times A_t = 880,8414 \text{ kN} \\
 P_{eff} &= P_i - \Delta P \\
 &= 6935,899 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan NAASRA 1976 Section 6, kehilangan tegangan akibat relaksasi tendon untuk baja prategang berkisar 5%-12% tergantung pada tegangan awal tendon. Dengan kehilangan tegangan yang dihitung sebesar 880,84 kN, hasil ini sesuai dengan standar.

6. Kehilangan gaya prategang total

Kehilangan gaya prategang total merupakan akumulasi faktor yang menyebabkan berkurangnya tegangan dalam tendon seperti gesekan, pemendekan elastis,

pengangkuran, relaksasi tendon, susut, dan rayapan. Total kehilangan tegangan dihitung dengan perbandingan gaya efektif terhadap gaya awal.

$$\begin{aligned}
 P_{Loss} &= \left(1 - \frac{P_{eff}}{P_i}\right) \times 100\% \\
 &= 11,268654\% \approx 12\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan spesifikasi NAASRA 1976 Section 6, total kehilangan prategang tidak boleh melebihi 15% gaya awal. Dengan kehilangan sebesar 12%, hasil ini masih berada dalam batas yang dapat diterima.

7. Kontrol tegangan pada tendon pasca *stressing*

Kontrol tegangan pada tendon *pasca-stressing* merupakan tahap penting dalam evaluasi struktur prategang untuk memastikan bahwa tegangan yang tersisa setelah mengalami berbagai kehilangan masih berada dalam batas aman.

$$\begin{aligned}
 f_{pu} &= 1860000 \text{ kPa} \\
 \sigma_{strand} &= 0,7 \times f_{pu} \\
 &= 1581000 \text{ kPa} \\
 f_p &= \frac{P_{eff}}{A_t} \\
 &= 1300289,2 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

$f_p < 0,7 \times f_{pu} \dots \dots$ (ok)

Tegangan pada tendon setelah kehilangan tidak boleh melebihi 70% dari tegangan *ultimate strand* (f_{pu}). Dengan tegangan *pasca-stressing* sebesar 1300289,2 kPa, hasil ini masih memenuhi persyaratan keamanan.

8. Rekapitulasi *loss of prestress*

Rekapitulasi kehilangan gaya prategang (*loss of prestress*) dilakukan untuk mengevaluasi total kehilangan tegangan akibat berbagai faktor, seperti gesekan angkur, gesekan kabel, pemendekan elastis, pengangkuran, susut, dan rayapan. Dengan menghitung total kehilangan gaya prategang, dapat dipastikan apakah nilai akhir tegangan masih berada dalam batas yang diperbolehkan oleh standar, seperti yang ditetapkan dalam NAASRA 1976 maupun AASHTO 2020. Total kehilangan gaya prategang yang dihitung dengan perbandingan gaya efektif terhadap gaya awal adalah 11,27% atau dibulatkan menjadi 12%. Meskipun kehilangan ini relatif tinggi, namun masih dalam rentang yang dapat diterima dalam struktur prategang. Hasil menunjukkan bahwa tegangan efektif tendon ($f_p = 1300289,2 \text{ kPa}$) lebih kecil dari 70% dari tegangan *ultimate strand* ($\sigma_{strand} = 1581000 \text{ kPa}$), sehingga kondisi ini masih memenuhi persyaratan keamanan. Rekapitulasi nilai *loss of prestress* disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi *Loss of Prestress*

Kehilangan tegangan	Gaya	kN	%UTS
Gesekan angkur	P	9000	89%
Gesekan Jack	P_0	8730	86%
Pemendekan elastik	P_x	8124,51	80%
Relaksasi tendon	P_i	7816,74	77%
	P_{eff}	6935,899	69%
<i>Total Loss of Prestress = 12%</i>			

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besarnya kehilangan gaya prategang pada PCI girder akibat metode post-tension single stressing, serta mengidentifikasi faktor-faktor utama yang menyebabkan penurunan tegangan. Berdasarkan hasil analisis, ditemukan bahwa kehilangan gaya prategang dalam struktur PCI girder dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu gesekan ankur, pemendekan elastis, dan relaksasi tendon. Faktor gesekan pada ankur memberikan kontribusi kehilangan sebesar 3% dari gaya jacking awal. Penurunan ini dapat berdampak kumulatif terhadap daya dukung struktur, sehingga diperlukan pengendalian kualitas dalam proses pengukuran untuk memastikan distribusi tegangan yang merata. Pemendekan elastis menyebabkan kehilangan sebesar 307,766 kN, sedangkan relaksasi tendon menjadi faktor dominan dengan kontribusi kehilangan hingga 12% dari gaya prategang awal. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik material tendon dan sifat susutnya seiring waktu. Selain itu, gesekan kabel selama proses stressing juga menghasilkan kehilangan yang signifikan, dengan gaya prategang berkurang dari 9000 kN menjadi 8125 kN di tengah bentang. Temuan ini menegaskan pentingnya optimalisasi proses stressing serta penggunaan material dengan sifat mekanis yang lebih stabil untuk memastikan keandalan dan durabilitas struktur prategang. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam bentuk rekomendasi teknis, yaitu:

1. Penggunaan tendon baja dengan tingkat relaksasi rendah,
2. Peningkatan teknik grouting untuk meminimalkan gesekan tendon,
3. Monitoring berkala terhadap kehilangan gaya prategang selama umur layan struktur.

Dengan penerapan metode stressing yang optimal dan pemilihan material berkualitas tinggi, diharapkan kinerja PCI girder dapat meningkat secara signifikan dalam jangka panjang. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan pada asumsi perhitungan dan keterbatasan data empiris di lapangan. Oleh karena itu, studi lanjutan disarankan untuk mengembangkan pendekatan eksperimental dan numerik yang lebih komprehensif, serta memperhitungkan pengaruh lingkungan seperti suhu dan kelembaban.

Selain itu, karena penelitian ini berfokus pada proyek tertentu, hasilnya harus disesuaikan dengan karakteristik dan spesifikasi proyek lainnya. Meskipun demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan awal bagi pengembangan standar desain jembatan prategang yang lebih responsif terhadap kondisi aktual. Dengan inovasi dalam material dan teknologi konstruksi, penelitian ini diharapkan dapat mendukung peningkatan mutu, efisiensi, dan ketahanan struktur jembatan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Tang, J. Zheng, and Y. Wang, "Bridge Health Monitoring Systems: An Overview of Recent Developments," *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1885, 2019.
- [2] H.-K. Choi, J.-K. Kim, dan Y.-C. Kim, "Prediction of long-term prestress losses in prestressed concrete bridges," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [3] S. Purwanto, "Analisis kehilangan gaya prategang pada jembatan PCI girder menggunakan metode post-tension," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 10, no. 2, pp. 65–72, 2021.
- [4] T. Nguyen, K. Do, dan M. L. Nguyen, "Time-dependent behavior of prestressed concrete beams under tropical climate," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 218–228, 2018.
- [5] A. Triyono, "Studi kehilangan tegangan prategang pada balok beton prategang dengan mempertimbangkan relaksasi dan shrinkage beton," *Jurnal Konstruksi*, vol. 9, no. 1, pp. 33–40, 2020.
- [6] M. Rachman, "Evaluasi kehilangan tegangan prategang pada lingkungan tropis terhadap umur layan struktur PCI girder," *Jurnal Rekayasa Struktur*, vol. 12, no. 3, pp. 122–130, 2022.
- [7] H. Chen and B. Graybeal, "Time-Dependent Prestress Losses in Ultra-High-Performance Concrete Bridge Girders," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 25, no. 2, p. 04019100, 2020.
- [8] R. I. Gilbert, N. C. Mickleborough, and G. Ranzi, *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2*. CRC Press, 2018.
- [9] AASHTO, *LRFD Bridge Design Specifications*, 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [10] D. Hu, *Analysis and Design of Prestressed Concrete*. Elsevier, 2022.
- [11] Z. P. Bažant and S. Baweja, "Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage 1. Statistics and sensitivity," *Materials and Structures*, vol. 28, pp. 415–430, 199.
- [12] K. Raju, *Prestressed Concrete*. McGraw Hill India, 2018.
- [13] R. F. Warner, S. Foster, A. Kilpatrick, and R. Gravina, *Prestressed Concrete*. Pearson Education, 2022.
- [14] E. Nawy, *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. Pearson, 2009.
- [15] National Association of Australian State Road Authorities (NAASRA), "Bridge Design Specification, Section:6 Prestressed Concrete Design," 1976.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, SNI 1725:2016 - Pembebanan untuk Jembatan, 2016
- [17] ASTM C939-02, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete, ASTM International.
- [18] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM International.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, SNI 1154:2016 - Tujuh Kawat Baja Tanpa Lapisan Dipilin Untuk Konstruksi Beton Pratekan (PC Strand/KBjP-p7), 2016.