**JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)**
Vol. 22 No. 2, Juli 2026
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

# RESPONS KONSTRUKSI–LAYAN BOX GIRDER PRATEGANG JEMBATAN PANDANSIMO DENGAN METODE BALANCED CANTILEVER

**KOHAR YUDOPRASETYO[1*], MUHAMMAD SIGIT DARMAWAN[2], RP MUHAMMAD AUNARIQ RINANDA[3]**

[1] *Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur*
[2] *Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur*
[3] *Mahasiswa Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Jawa Timur*

[*]*Corresponding Author:* kohar.yudo@its.ac.id

Naskah diterima: 4 Februari 2026. Disetujui: 19 Mei 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

## ABSTRAK

Jembatan Pandansimo merupakan infrastruktur strategis pada koridor Jalan Lintas Selatan Daerah Istimewa Yogyakarta yang menghubungkan Kabupaten Bantul dan Kabupaten Kulon Progo. Pada desain eksisting, bentang utama menggunakan sistem Corrugated Steel Plate (CSP) dengan jumlah pilar relatif banyak sehingga berpotensi mengganggu aliran Sungai Progo. Penelitian ini mengevaluasi alternatif desain bentang tengah menggunakan box girder beton prategang dengan metode balanced cantilever cast in situ untuk mengurangi jumlah pilar sekaligus memastikan kinerja struktur pada tahap konstruksi dan tahap operasional. Analisis dilakukan menggunakan SAP2000 dengan pendekatan staged construction. Parameter evaluasi meliputi tegangan serat, lendutan, tegangan tarik utama, dan perbandingan momen servis terhadap momen retak. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada tahap konstruksi, lendutan maksimum kondisi kantilever sebesar 50,20 mm masih lebih kecil dari batas L/400 sebesar 170 mm. Pada kondisi operasional, lendutan maksimum sebesar 14,80 mm juga masih memenuhi batas L/800 sebesar 175,93 mm. Tegangan tarik maksimum serat bawah dan atas masing-masing sebesar 1,0 MPa dan 0,8 MPa, lebih rendah dari batas izin 2,33 MPa. Tegangan tarik utama dan momen servis juga masih berada di bawah batas kritis. Dengan demikian, alternatif box girder prategang balanced cantilever memenuhi kriteria kinerja konstruksi dan operasional serta berpotensi mengurangi gangguan struktur terhadap aliran sungai.

**Kata kunci** : Jembatan, Box Girder, Beton Prategang, Balanced Cantilever

## 1. PENDAHULUAN

Jembatan Pandansimo merupakan bagian dari pengembangan Jalan Lintas Selatan di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta yang berfungsi menghubungkan Kabupaten Bantul dan Kabupaten Kulon Progo. Keberadaan jembatan ini diharapkan dapat meningkatkan

konektivitas wilayah, memperlancar distribusi barang dan jasa, serta mendukung pengembangan kawasan pesisir selatan.

Secara keseluruhan, Jembatan Pandansimo memiliki panjang sekitar 1.900 m dan terbagi ke dalam tiga zona struktur. Zona 1 berada di wilayah Kabupaten Kulon Progo, zona 2 merupakan bentang utama yang melintasi Sungai Progo, sedangkan zona 3 berada di wilayah Kabupaten Bantul. Pada desain eksisting, zona 1 dan zona 3 menggunakan sistem slab on pile, sedangkan zona 2 sebagai bentang utama menggunakan sistem Corrugated Steel Plate (CSP) atau pelat baja bergelombang (Janizar et al., 2022).



**Gambar 1**. Layout Jembatan Pandansimo saat konstruksi (Balai Besar Pelaksaan Jalan Nasional Jawa Tengah - DI Yogyakarta, 2024)

Struktur bentang utama dengan sistem CSP dikombinasikan dengan mortar busa sebagai material pengisi. Sistem ini memiliki keunggulan karena mortar busa memiliki berat jenis yang relatif ringan dibandingkan material beton konvensional, sehingga dapat mengurangi beban struktur (Asri et al., 2024). Namun, penggunaan bentang CSP yang relatif pendek, yaitu sekitar 17,5–25 m, menyebabkan jumlah pilar pada alur sungai menjadi cukup banyak. Kondisi ini berpotensi mengganggu aliran Sungai Progo, terutama karena luas penampang sungai tidak boleh berkurang secara signifikan akibat keberadaan pilar jembatan (Walujodjati & Eka Cahya Gumilar, 2022). Dalam naskah Bapak, bagian ini memang menjadi dasar utama perlunya alternatif desain dengan jumlah pilar yang lebih sedikit.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan ulang bentang tengah Jembatan Pandansimo pada STA 0+800 hingga STA 1+475 menggunakan box girder beton prategang dengan metode konstruksi *balanced cantilever cast in situ*. Alternatif ini dipilih karena box girder memiliki efisiensi struktural yang baik untuk bentang panjang, sedangkan metode *balanced cantilever* memungkinkan pelaksanaan konstruksi tanpa kebutuhan *scaffolding* masif di atas aliran sungai. Dengan demikian, alternatif ini berpotensi mengurangi jumlah pilar sekaligus meningkatkan aspek konstruktabilitas pada kondisi sungai besar.

Pada struktur beton prategang, respons struktur sangat dipengaruhi oleh tahapan pelaksanaan. Tahap konstruksi perlu dievaluasi karena struktur bekerja sebagai kantilever sementara dan menerima beban berat sendiri segmen, beton segar, *form traveller*, serta gaya prategang bertahap. Setelah *closure segment* terpasang, struktur berubah menjadi sistem bentang menerus sehingga distribusi gaya dalam, tegangan, dan lendutan juga berubah. Oleh karena itu, evaluasi struktur perlu dilakukan tidak hanya pada kondisi akhir, tetapi juga pada tahap konstruksi dan tahap layan. (Fauzan Ibrahim & Kholiq, 2023).

Kinerja layan jembatan beton prategang umumnya dikontrol melalui tegangan tarik, lendutan, tegangan tarik utama, serta potensi retak. Kompleksitas evaluasi meningkat karena adanya interaksi antara gaya prategang, kehilangan prategang, rangkak, susut, dan perubahan sistem struktur selama konstruksi. Pemodelan numerik berbasis elemen hingga dapat digunakan untuk menangani kompleksitas tersebut, tetapi verifikasi analitis tetap diperlukan agar hasil numerik memiliki dasar mekanika yang kuat dan dapat dikontrol secara independen.

Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah membahas konstruksi box girder, struktur beton prategang, kehilangan prategang, dan analisis lendutan, kajian yang secara spesifik mengaitkan pengurangan jumlah pilar pada alur sungai dengan evaluasi respons tahap konstruksi–layan masih terbatas. Keterbatasan ini menjadi penting karena desain alternatif Jembatan Pandansimo tidak hanya harus memenuhi aspek kekuatan dan kinerja layanan, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek hidraulik dan konstruktabilitas.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi alternatif desain bentang tengah Jembatan Pandansimo menggunakan box girder beton prategang dengan metode *balanced cantilever cast in situ*. Evaluasi dilakukan melalui pemodelan numerik SAP2000 dengan pendekatan *staged construction*, serta diverifikasi menggunakan perhitungan lendutan analitis balok kantilever ekuivalen. Parameter yang ditinjau meliputi tegangan serat, lendutan tahap konstruksi dan servis, tegangan tarik utama, serta perbandingan momen servis terhadap momen retak.

Untuk memperjelas posisi penelitian terhadap kajian terdahulu, disusun ringkasan *state of the art* dan *research gap* sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**. Tabel ini menunjukkan bahwa penelitian sebelumnya telah membahas aspek perencanaan jembatan, pelaksanaan girder, risiko konstruksi box girder, pengaruh prategang, serta analisis lendutan. Namun, kajian yang secara khusus mengevaluasi alternatif desain box girder prategang Jembatan Pandansimo dengan mempertimbangkan reduksi jumlah pilar, respons tahap konstruksi–layan, dan verifikasi lendutan analitis terhadap model SAP2000 masih terbatas.

**Tabel 1.** State of the Art dan Research Gap Penelitian

| No. | Peneliti | Fokus Kajian | Metode Kajian | Keterbatasan terhadap Penelitian Ini | Kontribusi Penelitian Ini |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | (Janizar et al., 2022) | Perencanaan jembatan dan konfigurasi struktur jembatan | Studi perencanaan jembatan dengan tinjauan geometri dan sistem struktur | Belum membahas modifikasi bentang utama Jembatan Pandansimo dengan tujuan mengurangi jumlah pilar pada alur sungai | Penelitian ini secara spesifik mengevaluasi alternatif desain bentang tengah Jembatan Pandansimo dengan sistem box girder prategang |

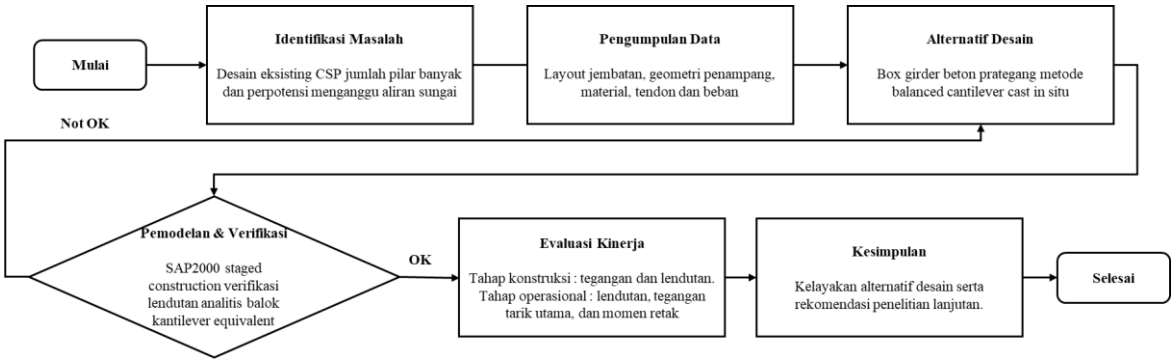
| No. | Peneliti | Fokus Kajian | Metode Kajian | Keterbatasan terhadap Penelitian Ini | Kontribusi Penelitian Ini |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | (Asri et al., 2024) | Efisiensi pekerjaan girder dan metode pelaksanaan jembatan | Evaluasi biaya dan waktu pekerjaan girder erection | Fokus pada metode pelaksanaan girder, belum mengevaluasi respons tahap konstruksi–layan pada box girder prategang bentang panjang | Penelitian ini mengevaluasi respons struktur pada tahap konstruksi dan tahap servis menggunakan pendekatan *staged construction* |
| 3 | (Isnaeni & Herzanita, 2022) | Risiko pelaksanaan box girder *cast in situ* | Analisis risiko pekerjaan konstruksi box girder | Belum membahas evaluasi numerik tegangan dan lendutan pada sistem *balanced cantilever* | Penelitian ini menambahkan evaluasi struktural terhadap lendutan, tegangan, dan kinerja layanan |
| 4 | (He et al., 2020) | Teknologi konstruksi box girder prategang | Kajian konstruksi box girder prategang pada bentang panjang | Tidak secara khusus membahas pengurangan jumlah pilar pada sungai besar dan konteks jembatan di Indonesia | Penelitian ini mengaitkan pemilihan box girder prategang dengan reduksi elemen penyangga pada alur Sungai Progo |
| 5 | (Kraľovanec et al., 2021) | Verifikasi prategang pada elemen beton prategang | Evaluasi kondisi aktual prategang pada elemen struktur | Fokus pada verifikasi gaya prategang, belum membahas perubahan respons akibat tahapan konstruksi jembatan segmental | Penelitian ini mempertimbangkan pengaruh prategang dalam evaluasi tahap kantilever dan tahap servis |
| 6 | (Zebua et al., 2022)` | Pengaruh gaya prategang terhadap struktur jembatan | Analisis pengaruh prategang pada elemen jembatan | Belum mengintegrasikan evaluasi *staged construction* dan perubahan sistem dari kantilever ke bentang menerus | Penelitian ini mengevaluasi dua fase utama, yaitu tahap konstruksi kantilever dan tahap servis bentang menerus |
| 7 | (Liu et al., 2024) | Pemodelan konstruksi jembatan bentang panjang | Analisis numerik konstruksi jembatan box girder | Tidak difokuskan pada box girder beton prategang *cast in situ* dengan konteks reduksi pilar sungai | Penelitian ini menggunakan SAP2000 *staged construction* untuk mengevaluasi alternatif desain Jembatan Pandansimo |
| 8 | (Yudoprasetyo et al., 2026) | Verifikasi lendutan jembatan | Pendekatan analitis berbasis metode energi/Castigliano | Belum mengkaji integrasi verifikasi analitis dengan model | Penelitian ini membandingkan lendutan analitis balok kantilever |

| No. | Peneliti | Fokus Kajian | Metode Kajian | Keterbatasan terhadap Penelitian Ini | Kontribusi Penelitian Ini |
|---|---|---|---|---|---|
| | | beton prategang | | SAP2000 pada tahap konstruksi *balanced cantilever* | ekuivalen dengan output SAP2000 |
| 9 | Penelitian ini | Respons konstruksi–layan box girder prategang Jembatan Pandansimo | SAP2000 *staged construction*, verifikasi lendutan analitis, kontrol tegangan, lendutan, tegangan tarik utama, dan momen retak | — | Memberikan alternatif teknis untuk mengurangi jumlah pilar pada bentang utama sekaligus memastikan kinerja konstruksi dan layanan struktur |

Berdasarkan **Tabel 1**, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara kebutuhan reduksi jumlah pilar di alur sungai, pemodelan numerik *staged construction*, dan verifikasi lendutan analitis pada sistem box girder prategang *balanced cantilever*. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menilai kelayakan struktur pada tahap servis, tetapi juga mengevaluasi respons struktur selama tahap konstruksi yang menjadi fase kritis pada metode *balanced cantilever*.

## 2. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian disusun secara ringkas agar alur evaluasi alternatif desain box girder beton prategang pada Jembatan Pandansimo dapat dipahami dengan jelas. Proses dimulai dari identifikasi masalah pada desain eksisting, dilanjutkan dengan pengumpulan data, penetapan alternatif desain, pemodelan dan verifikasi, evaluasi kinerja struktur, serta penarikan kesimpulan.




**Gambar 2.** Flowchart penelitian evaluasi box girder beton prategang Jembatan Pandansimo.

### 2.1. Kondisi Lokasi Jembatan

Penelitian ini dilakukan pada Jembatan Pandansimo yang menghubungkan Kabupaten Bantul dan Kabupaten Kulon Progo di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Lokasi studi difokuskan pada segmen bentang utama yang melintasi Sungai Progo, mengingat segmen

ini merupakan bagian paling kritis terhadap interaksi struktur–hidraulik serta memiliki konsekuensi langsung terhadap kebutuhan jumlah pilar di dalam alur sungai. Penetapan batasan lokasi dan orientasi aliran (hulu–hilir) dilakukan melalui penelaahan layout geometrik jembatan, dokumentasi lapangan/foto udara, serta penentuan titik referensi STA untuk memastikan konsistensi analisis dan pengambilan parameter desain. Informasi kondisi lokasi ini menjadi dasar dalam merumuskan alternatif konfigurasi struktur yang mampu mengurangi gangguan terhadap aliran sungai sekaligus tetap memenuhi tuntutan performa struktural dan konstruktabilitas.

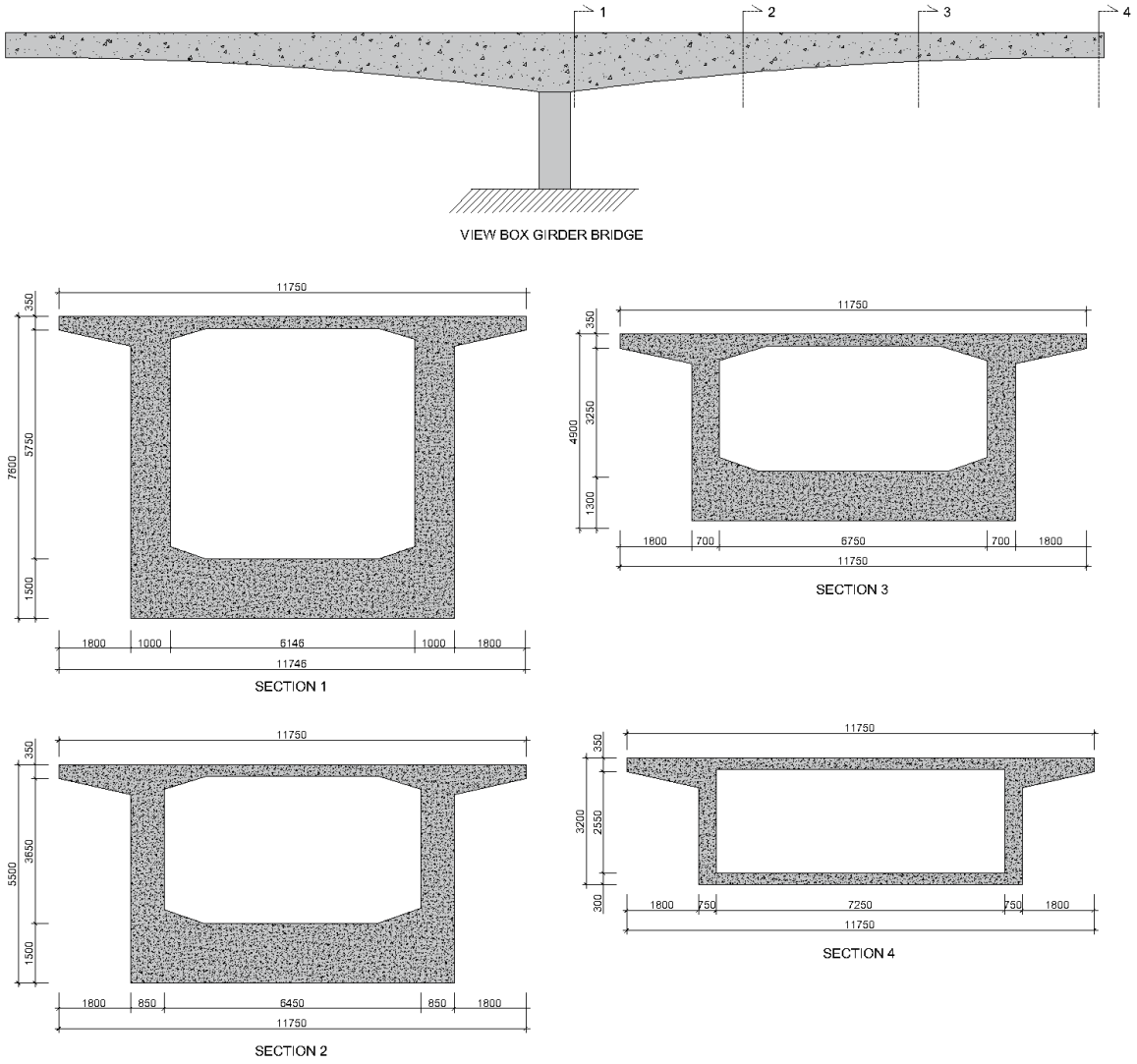



**Gambar 3.** Lokasi tampak atas Jembatan

## 2.2. Spesifikasi Jembatan

Objek kajian pada penelitian ini adalah jembatan dengan panjang total 701 m dan lebar 24 m, yang tersusun atas enam bentang dengan panjang berturut-turut 69 m – 140,5 m – 140,5 m – 140,5 m – 140,5 m – 69 m. Sistem struktur direncanakan menggunakan 5 pilar utama pada bentang tengah serta 2 pilar penghubung sebagai transisi menuju jembatan pendekat. Superstruktur dirancang berupa box girder beton prategang tipe *twin box*, terdiri atas dua box dengan lebar masing-masing 11,75 m dan jarak antarbox 0,50 m, sehingga total lebar efektif superstruktur sesuai kebutuhan geometrik jembatan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4, konfigurasi penampang box girder bervariasi sepanjang bentang (ditandai *Section* 1 hingga *Section* 4) mengikuti perubahan tinggi penampang dari zona tumpuan menuju daerah lapangan untuk mencapai efisiensi kekakuan dan kapasitas. Section 1 merepresentasikan lokasi tumpuan (daerah pier table) dengan tinggi penampang maksimum sebesar 7,6 m, sedangkan Section 4 merepresentasikan daerah lapangan dengan tinggi penampang minimum sebesar 3,2 m. Material utama yang digunakan adalah beton mutu tinggi dengan $f_c' = 50\,\text{MPa}$, tulangan BjTS 420B, serta tendon prategang berupa strand OVM ASTM A416-06 Grade 270. Selanjutnya modulus elastisitas beton mengacu pada ((CEB), 2010; Maldar et al., 2024) dimana didapatkan nilai modulus elastisitas beton sebesar 36,01 GPa. Spesifikasi geometrik dan material pada Gambar 4 ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam penentuan dimensi awal penampang, konfigurasi tendon,

serta evaluasi kinerja struktur pada tahap konstruksi (kantilever) maupun tahap layan (servis).

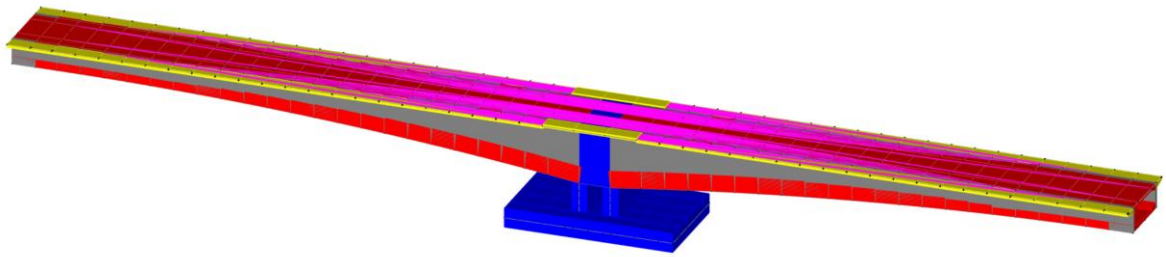



**Gambar 4.** Spesifikasi Penampang Jembatan

## 2.3. Pembebanan Jembatan

Pembebanan disusun untuk merepresentasikan respons struktur pada dua kondisi dominan, yaitu tahap konstruksi (staged construction) dan tahap layan (service). Pada tahap konstruksi, beban yang diperhitungkan meliputi berat sendiri segmen yang diaktivasi bertahap, berat beton segar, beban peralatan dan *form traveller*, serta penerapan gaya prategang sesuai urutan pengecoran dan penegangan tendon pada setiap segmen. Pada tahap layan, struktur dievaluasi terhadap beban permanen dan beban operasional yang meliputi beban mati, beban mati tambahan (misalnya lapis perkerasan, *barrier*, dan utilitas), beban lalu lintas, beban angin, serta beban gempa sesuai ketentuan peraturan pembebanan jembatan yang berlaku. Selain itu, pengaruh jangka panjang pada struktur prategang dipertimbangkan melalui komponen kehilangan prategang (susut dan rangkak beton serta relaksasi baja prategang) agar prediksi tegangan layanan dan kontrol lendutan jangka panjang lebih representatif (Nugroho et al., 2025).

## 2.4. Pemodelan Struktur Jembatan



**Gambar 5.** Pemodelan struktur Jembatan Tahap Kantilever



**Gambar 6.** Pemodelan struktur Jembatan Tahap Servis (bentang menerus)

Pemodelan struktur pada penelitian ini (Gambar 5 untuk tahap kantilever dan Gambar 6 untuk tahap servis) dilakukan melalui pendekatan penyederhanaan (*idealization*) dengan merepresentasikan sistem jembatan menggunakan satu pilar jembatan sebagai model kajian. Penyederhanaan ini ditetapkan untuk memfokuskan analisis pada respons struktur atas box girder selama tahapan konstruksi *balanced cantilever* serta meningkatkan efisiensi komputasi, tanpa mengurangi karakteristik perilaku utama yang ditinjau pada zona kritis di sekitar tumpuan. Superstruktur box girder dan elemen pilar dimodelkan menggunakan shell element untuk menangkap distribusi tegangan dan deformasi secara lebih realistis pada pelat lantai, web, dan slab bawah box girder, serta pada badan pilar. Jenis koneksi shell-to-shell antara box girder dan pier diasumsikan menggunakan *rigid link*, karena kedua elemen tersebut terhubung secara monolit (*monolith*) sehingga kompatibilitas deformasi dan transfer gaya pada sambungan dapat direpresentasikan secara kaku (Liu et al., 2024). Kondisi batas (*boundary condition*) diterapkan pada pilecap, dengan asumsi jepit (*fixed*) pada titik-titik representasi bored pile, sehingga rotasi dan translasi pada lokasi tersebut dibatasi. Dalam penelitian ini, perilaku pondasi (misalnya interaksi tanah–struktur, deformasi tiang, dan kekakuan tanah) tidak menjadi ruang lingkup pembahasan, sehingga sistem fondasi diperlakukan sebagai perletakan kaku untuk memusatkan evaluasi pada kinerja struktur atas dan pilar. Selanjutnya, sistem prategang dimodelkan menggunakan frame tendon elements untuk mendukung analisis staged construction, yaitu penerapan gaya prategang secara bertahap mengikuti urutan aktivasi segmen dan tahapan pelaksanaan *balanced cantilever*, sehingga respons struktur pada tahap kantilever hingga tahap layan dapat dievaluasi secara konsisten (Kraľovanec et al., 2021).

## 2.5. Verifikasi Lendutan Analitis terhadap Model Numerik

Verifikasi lendutan analitis dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi hasil pemodelan numerik SAP2000 pada tahap konstruksi *balanced cantilever*. Verifikasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan lendutan balok kantilever ekuivalen terhadap output lendutan SAP2000 pada kondisi konstruksi. Pendekatan ini relevan karena pada tahap konstruksi, sistem struktur box girder prategang bekerja sebagai kantilever sementara dari tepi kolom menuju ujung segmen sebelum *closure segment* dipasang. Pada jembatan box girder prategang, metode kantilever bebas banyak digunakan untuk konstruksi bentang panjang, dan tahapan konstruksi berpengaruh terhadap perilaku deformasi struktur,

terutama karena gaya tendon sudah bekerja pada beton sejak fase awal konstruksi (Purba et al., 2022).

Dalam verifikasi ini, box girder dimodelkan secara analitis sebagai balok kantilever ekuivalen dengan panjang efektif 68 m dari tepi kolom menuju ujung kantilever. Kekakuan lentur struktur tidak dianggap konstan, tetapi divariasikan sepanjang bentang berdasarkan properti penampang Section 1 sampai Section 4. Modulus elastisitas beton dihitung berdasarkan pendekatan CEB-FIB Model Code 2010, di mana modulus elastisitas beton normal pada umur 28 hari dihitung sebagai fungsi dari kuat tekan rata-rata beton ((CEB), 2010). Momen inersia penampang dihitung menggunakan penampang *gross* twin box girder, sehingga model analitis tetap mempertimbangkan perubahan kekakuan akibat variasi tinggi penampang dari zona dekat pilar menuju ujung kantilever.

Lendutan akibat berat sendiri dihitung menggunakan metode beban satuan (*unit load method*) atau metode kerja virtual. Metode ini menyatakan bahwa lendutan pada suatu titik dapat dihitung dari integrasi hasil kali momen akibat beban aktual dan momen akibat beban satuan terhadap kekakuan lentur elemen. Formulasi umum metode ini dituliskan sebagai berikut (Permata, 2025):

$$\Delta = \int_0^L \frac{M_{(x)} m_{(x)}}{E_c I_{(x)}} dx \tag{1}$$

Dengan Δ adalah lendutan pada titik yang ditinjau, $M_{(x)}$ adalah momen lentur akibat beban aktual, $m_{(x)}$ adalah momen lentur akibat beban satuan pada titik tinjauan, $E_c$ adalah modulus elastisitas beton, dan $I_{(x)}$ adalah momen inersia penampang yang berubah sepanjang kantilever. Untuk kantilever akibat beban sendiri, intensitas beban sepanjang bentang dihitung berdasarkan luas penampang dan berat jenis beton.

Karena struktur yang dianalisis merupakan box girder beton prategang, pengaruh prestress juga perlu diperhitungkan sebagai momen ekuivalen yang dapat menghasilkan *camber* ke atas. Pada tahap konstruksi *balanced cantilever*, tendon umumnya ditempatkan pada zona pelat atas untuk menghasilkan efek *upward camber* selama fase kantilever, sedangkan tendon bawah bekerja setelah sistem mencapai kondisi bentang menerus (Carlie & Akbar, 2021). Dalam SAP2000, tendon prategang dapat dimodelkan sebagai objek tendon atau sebagai beban ekuivalen, dan analisis *staged construction* diperlukan untuk merepresentasikan kontribusi kekakuan tendon sesuai tahapan penegangan, pengangkuran, dan grouting.

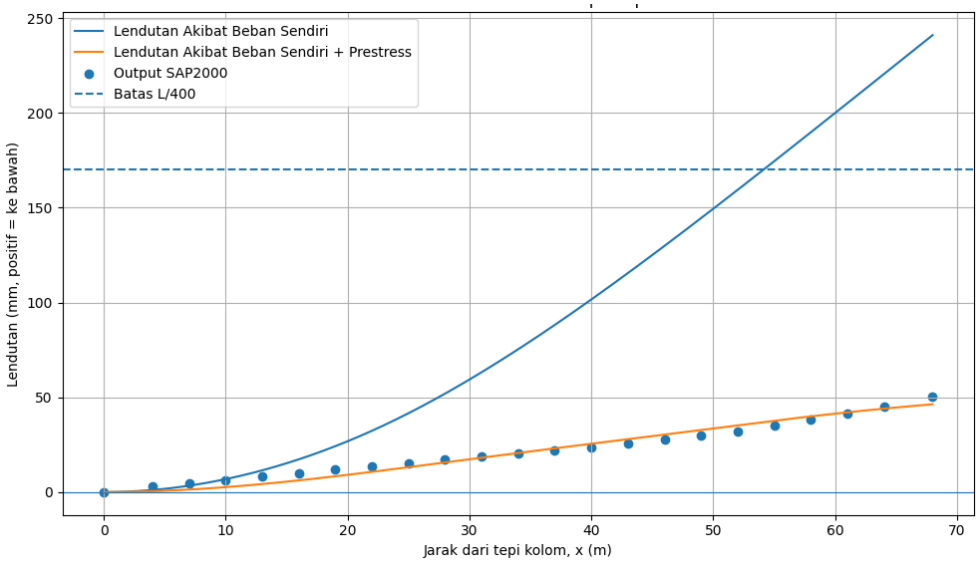
Hasil verifikasi menunjukkan bahwa lendutan akibat berat sendiri saja menghasilkan nilai yang jauh lebih besar dibandingkan output SAP2000. Lendutan analitis akibat berat sendiri pada ujung kantilever mencapai sekitar 240,97 mm. Nilai ini menunjukkan bahwa berat sendiri box girder memberikan kontribusi deformasi yang signifikan selama tahap konstruksi. Setelah pengaruh prestress diperhitungkan, kurva lendutan analitis menjadi lebih dekat dengan output SAP2000, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan hasil SAP2000, lendutan pada ujung kantilever sepanjang 68 m adalah sekitar 50,20 mm. Nilai ini masih lebih kecil daripada batas lendutan izin tahap konstruksi sebesar:

$$\frac{L}{400} = \frac{68000}{400} = 170\ mm \tag{2}$$

Dengan demikian, lendutan tahap konstruksi masih memenuhi kriteria layanan yang digunakan. Perbandingan antara kurva analitis dan output SAP2000 menunjukkan pola

deformasi yang konsisten, yaitu lendutan meningkat secara bertahap dari tepi kolom menuju ujung kantilever. Perbedaan antara hasil analitis dan SAP2000 masih dapat diterima karena model SAP2000 menggunakan elemen shell dan objek tendon yang mampu merepresentasikan distribusi kekakuan pelat atas, web, pelat bawah, serta pengaruh prestress secara lebih rinci, sedangkan model analitis menggunakan idealisasi balok kantilever ekuivalen satu dimensi (Computers & Structures, 2025).




**Gambar 7.** Verifikasi Lendutan Analitis terhadap Output SAP2000 pada Tahap Konstruksi

Secara umum, hasil verifikasi ini menunjukkan bahwa model numerik SAP2000 memiliki konsistensi terhadap prinsip mekanika struktur pada tahap konstruksi. Lendutan yang diperoleh dari SAP2000 tidak hanya memenuhi batas izin L/400, tetapi juga menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan hasil perhitungan analitis setelah pengaruh prestress diperhitungkan. Oleh karena itu, model numerik dinilai layak digunakan untuk mengevaluasi respons struktur pada tahap konstruksi *balanced cantilever*.

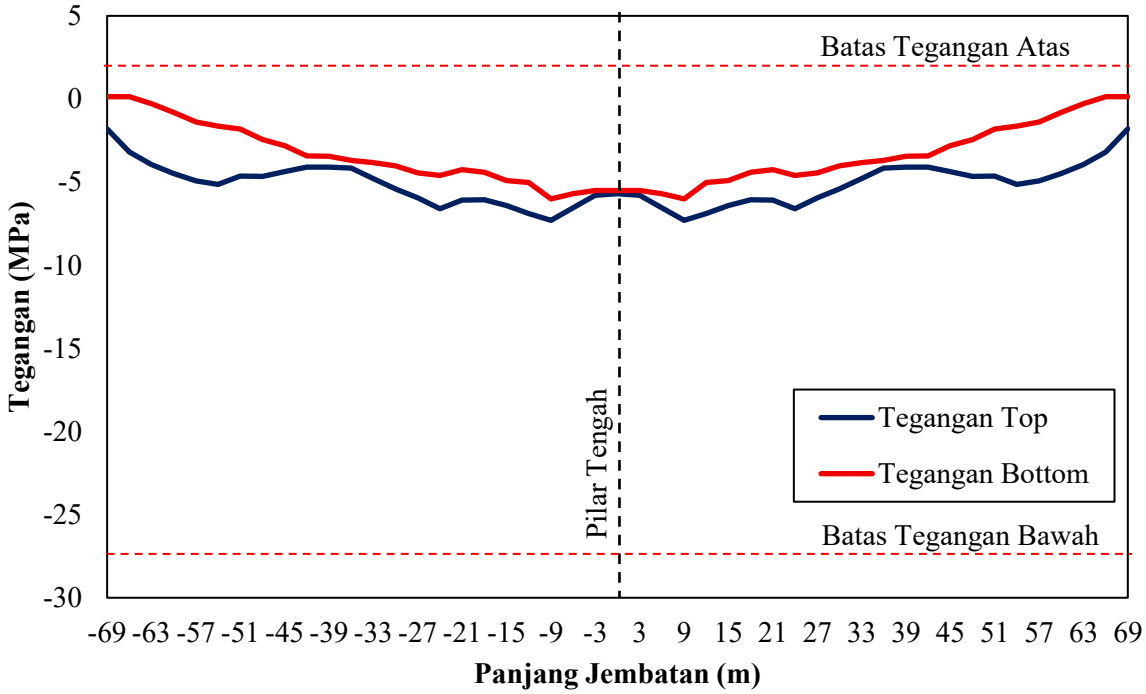
## 2.6. Analisa Struktur Jembatan

Analisis struktur dilakukan untuk memastikan bahwa desain memenuhi persyaratan kekuatan, stabilitas, dan kinerja layan pada setiap tahap pembebanan, dengan bantuan perangkat lunak SAP2000 (Computers & Structures, 2025) sebagai alat pemodelan dan analisis numerik. Melalui SAP2000, evaluasi dilakukan pada tahap konstruksi (*staged construction/balanced cantilever*) dengan memodelkan urutan aktivasi segmen, pembebanan sementara, dan penerapan gaya prategang bertahap untuk menilai kontrol defleksi struktur dan tegangan pada penampang kritis, serta reaksi tumpuan dan stabilitas sistem cantilever terhadap ketidakseimbangan beban selama erection. Tahap konstruksi menjadi indikator utama konstruktabilitas karena kondisi kritis sering muncul sebelum pemasangan segmen penutupan (*closure*) pada bentang panjang. Selanjutnya, pada tahap layan (servis/bentang menerus), SAP2000 digunakan untuk memeriksa tegangan layanan, kontrol lendutan jangka panjang dengan mempertimbangkan kehilangan prategang, serta verifikasi kondisi ultimit melalui kombinasi pembebanan rencana. Hasil analisis pada kedua tahap tersebut digunakan sebagai dasar iterasi desain guna memperoleh dimensi penampang dan kebutuhan prategang yang efisien, sekaligus memastikan bahwa konfigurasi struktur dengan 5 pilar utama dan 2 pilar penghubung layak diterapkan pada kondisi sungai besar dengan tuntutan performa dan keselamatan pelaksanaan yang tinggi.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Tahap Kantilever

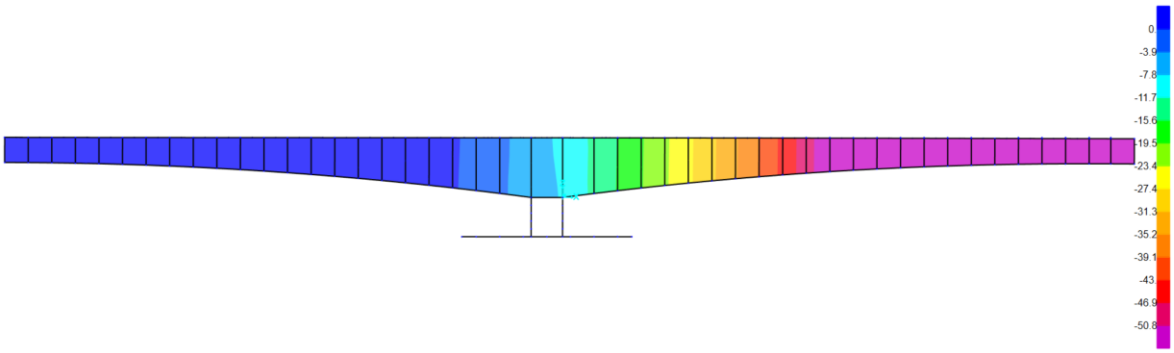
Pada tahap kantilever, box girder dibangun secara bertahap per segmen sehingga sistem berperilaku sebagai kantilever seimbang terhadap pilar (He et al., 2020). Kondisi pembebanan pada tahap ini bersifat sementara dan sangat dipengaruhi oleh urutan aktivasi segmen serta strategi pemberian prategang, dengan komponen dominan berupa berat sendiri segmen yang telah terpasang, beban konstruksi (misalnya *form traveller* dan berat beton segar), serta gaya prategang bertahap yang mengikuti urutan pengecoran. Hasil pemodelan *staged construction* menunjukkan bahwa kondisi yang paling kritis umumnya terjadi ketika panjang kantilever mencapai maksimum sebelum segmen penutupan (*closure segment*) dipasang, karena momen lentur dan rotasi di sekitar pilar meningkat seiring bertambahnya panjang lengan kantilever. Oleh karena itu, evaluasi pada tahap ini difokuskan pada indikator utama berupa tegangan serat atas–bawah pada komponen web dan slab di zona dekat pilar serta lendutan vertikal pada ujung kantilever, guna memastikan tidak terjadi tegangan tarik yang tidak terkendali dan deformasi yang berlebihan selama pelaksanaan.




**Gambar 8.** Grafik Tegangan pada Serat Atas dan Bawah Tahap Kantilever Output SAP2000

Distribusi tegangan serat atas (*top fiber*) dan serat bawah (*bottom fiber*) sepanjang lengan kantilever hingga fff69 m dari pilar ditunjukkan pada Gambar 8 Secara umum, tegangan pada kedua serat berada pada nilai negatif (tekan) di hampir seluruh panjang kantilever, yang mengindikasikan bahwa skema prategang tahap konstruksi masih efektif menjaga kondisi tegangan layanan. Tegangan tekan maksimum pada serat atas berada pada kisaran −7 hingga −8 MPa, sedangkan pada serat bawah berada pada kisaran −6 hingga −7 MPa. Di dekat ujung kantilever, tegangan serat bawah cenderung mendekati 0 MPa, menunjukkan bahwa serat bawah tetap berada pada kondisi yang tidak mengalami tarik signifikan pada tahap ini. Seluruh nilai tegangan juga masih berada di dalam batas tegangan atas–bawah yang ditunjukkan pada Gambar 4, sehingga respons tegangan pada tahap

kantilever dapat dinyatakan memenuhi kriteria tegangan tahap konstruksi dan tidak mengindikasikan kebutuhan koreksi besar pada prategang awal.




**Gambar 9.** Lendutan Yang Terjadi Akibat Beban Mati pada Tahap Kantilever

Selanjutnya, Gambar 9 memperlihatkan deformasi vertikal struktur pada tahap kantilever akibat beban mati melalui kontur perpindahan dan keluaran *Joint Displacements* dari SAP2000. Pola deformasi menunjukkan bentuk lendutan yang simetris terhadap pilar, dengan lendutan vertikal (U3) yang meningkat menuju ujung kantilever—perilaku yang lazim pada sistem *balanced cantilever* sebelum *closure*. Berdasarkan hasil keluaran, lendutan vertikal maksimum tercatat sekitar −14,8 mm (arah ke bawah). Nilai ini mengindikasikan bahwa pada tahap konstruksi yang ditinjau struktur memiliki kekakuan yang memadai untuk menahan beban sementara tanpa menghasilkan deformasi berlebihan, serta secara praktis masih dapat dikendalikan melalui pengaturan camber dan kontrol elevasi segmen selama pelaksanaan.

Selanjutnya, Gambar 9 memperlihatkan deformasi vertikal struktur pada tahap konstruksi kondisi kantilever akibat kombinasi beban konstruksi yang bekerja selama pelaksanaan. Pola deformasi menunjukkan bentuk lendutan yang simetris terhadap pilar, dengan lendutan vertikal (U3) meningkat menuju ujung kantilever. Perilaku ini sesuai dengan karakteristik sistem balanced cantilever sebelum closure segment dipasang. Berdasarkan hasil keluaran SAP2000, lendutan vertikal maksimum pada ujung kantilever tercatat sekitar 50,20 mm ke bawah. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur masih memiliki kekakuan yang memadai selama tahap konstruksi dan deformasi masih dapat dikendalikan melalui pengaturan camber serta kontrol elevasi segmen di lapangan.

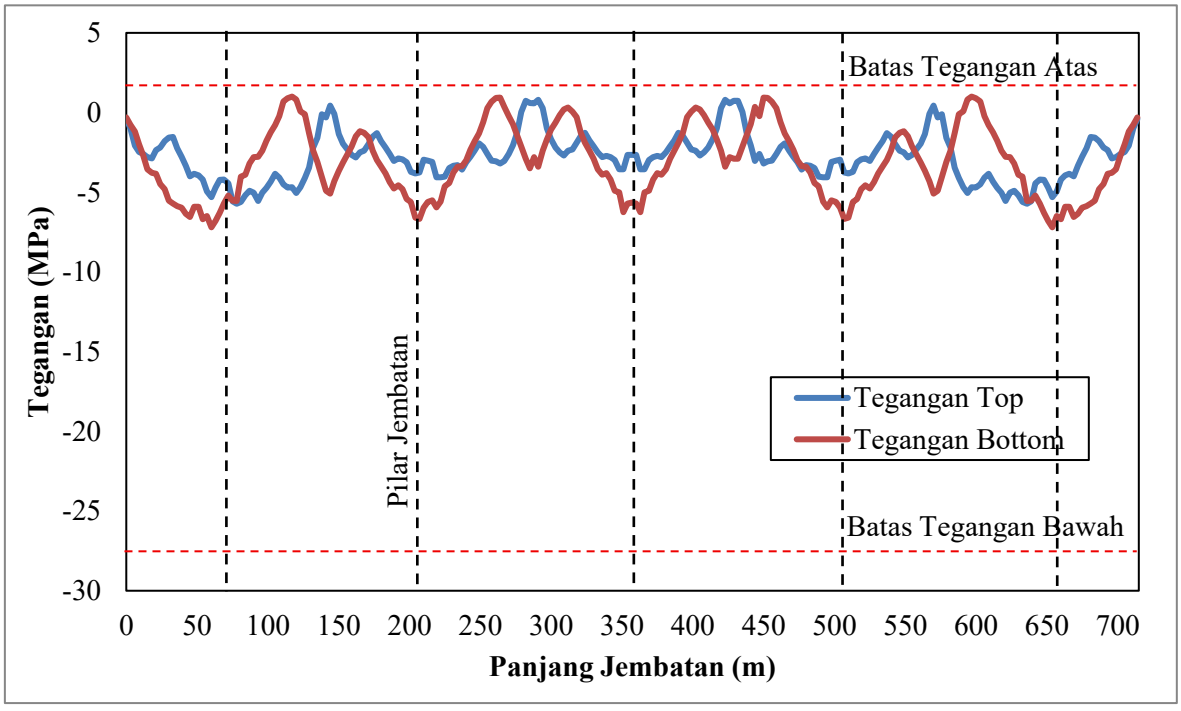
Mengacu pada Surat Edaran Kementerian PUPR Nomor 05/SE/Db/2017 (Kementerian PUPR. Dirjen Bina Marga, 2021), untuk jembatan dengan metode *balanced cantilever*, lendutan pada tahap pemasangan segmen terakhir dibatasi tidak melebihi L/400. Berdasarkan panjang kantilever efektif sebesar 68 m, diperoleh lendutan izin sebesar 170 mm. Dengan lendutan maksimum hasil analisis sebesar 50,20 mm (Gambar 9), lendutan yang terjadi setara dengan sekitar 29,5% dari batas yang diizinkan. Hal ini menegaskan bahwa deformasi pada tahap *erection* masih berada dalam batas yang dipersyaratkan, sehingga tahapan konstruksi dapat dilanjutkan menuju pemasangan *closure segment* dengan tingkat risiko deformasi yang terkendali.

Dengan tercapainya kondisi tegangan dan lendutan yang terkendali pada tahap kantilever, tahap berikutnya adalah transisi menuju tahap servis setelah segmen penutupan (*closure*) terpasang dan sistem struktur berubah dari kantilever sementara menjadi bentang menerus (*continuous span*). Perubahan skema struktur ini menyebabkan redistribusi gaya dalam yang signifikan, terutama meningkatnya momen negatif di atas pilar dan terbentuknya

momen positif di lapangan, sehingga evaluasi pada tahap servis tidak lagi hanya menekankan stabilitas erection, tetapi juga kinerja jangka panjang terhadap kombinasi beban permanen dan operasional. Selain itu, pada tahap servis pengaruh kehilangan prategang akibat rangkak–susut beton dan relaksasi tendon menjadi lebih dominan dalam menentukan tegangan layanan dan kontrol lendutan. Oleh karena itu, pembahasan selanjutnya diarahkan untuk menilai respons struktur pada kondisi bentang menerus, termasuk verifikasi tegangan dan lendutan pada keadaan layan, guna memastikan bahwa desain tidak hanya aman selama konstruksi, tetapi juga memenuhi persyaratan kinerja sepanjang umur rencana jembatan.

## 3.2. Tahap Servis (Bentang Menerus)

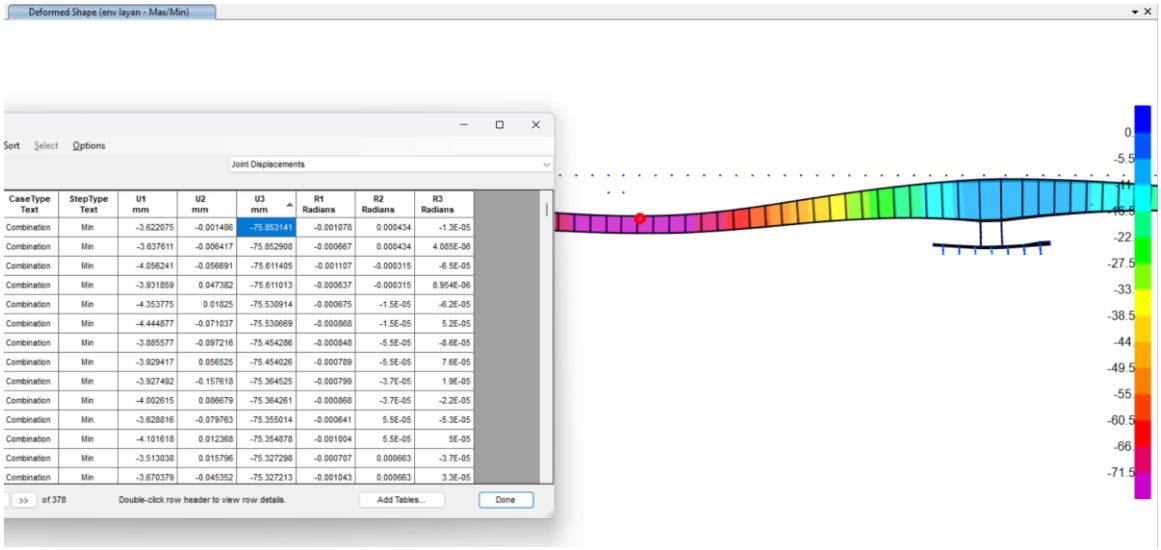
Pada tahap servis atau kondisi operasional, setelah *closure segment* terpasang, struktur berperilaku sebagai bentang menerus (*continuous span*) sehingga distribusi gaya dalam dan respons tegangan berbeda dibandingkan tahap kantilever. (Zhao et al., 2024). Evaluasi kinerja pada tahap ini difokuskan pada pemenuhan kriteria tegangan layanan (khususnya kontrol tegangan tarik untuk mencegah retak) dan lendutan akibat beban permanen/operasional dengan mempertimbangkan kondisi prategang efektif. Mengacu pada ketentuan Surat Edaran Menteri (Kementerian PUPR. Dirjen Bina Marga, 2021), batas lendutan izin pada tahap servis ditetapkan sebesar L/800, sehingga diperoleh lendutan izin 175,93 mm. Selain itu, batas tegangan tarik izin untuk kondisi layan ditetapkan sebesar 2,33 MPa sebagai kontrol retak pada elemen beton prategang.




**Gambar 10.** Grafik Tegangan pada Serat Atas dan Bawah Tahap Servis Output SAP2000

Berdasarkan hasil keluaran SAP2000 pada Gambar 10, distribusi tegangan serat atas (*top fiber*) dan serat bawah (*bottom fiber*) menunjukkan bahwa nilai tegangan tarik yang terjadi masih relatif kecil dan terkendali. Tegangan tarik maksimum pada serat bawah tercatat sekitar 1,0 MPa, sedangkan pada serat atas sekitar 0,8 MPa. Nilai tersebut lebih rendah daripada batas tegangan tarik izin 2,33 MPa, yaitu masing-masing sekitar 43% dan 34% dari nilai yang diizinkan. Hal ini mengindikasikan bahwa, pada kondisi servis, prategang efektif

dan kekakuan sistem bentang menerus masih mampu menjaga tingkat tegangan tarik dalam rentang aman sehingga potensi retak layanan dapat diminimalkan.




**Gambar 11.** Lendutan Yang Terjadi Akibat Beban Mati pada Tahap Servis

Selanjutnya, Gambar 11 menunjukkan deformasi vertikal struktur pada kondisi operasional setelah sistem struktur berubah menjadi bentang menerus. Dari keluaran *Joint Displacements* SAP2000, lendutan vertikal maksimum (U3) berada pada kisaran 14,80 mm ke bawah. Jika dibandingkan dengan batas lendutan izin L/800 sebesar 175,93 mm, nilai ini setara dengan sekitar 8,4% dari batas yang diperkenankan. Dengan demikian, baik dari aspek kontrol tegangan tarik maupun kontrol lendutan operasional, respons struktur dapat dinyatakan memenuhi persyaratan kinerja layan sesuai ketentuan yang digunakan.

Pada kondisi servis dengan sistem bentang menerus, tegangan tarik utama (*principal tensile stress*) pada web dapat timbul akibat interaksi antara tegangan geser ($\tau_v$)dan tegangan lentur ($\sigma_b$), sehingga kontrol tegangan tarik utama menjadi penting untuk mencegah retak diagonal pada zona kritis. Pemeriksaan tegangan tarik utama pada tahap servis dalam penelitian ini dilakukan menggunakan kombinasi layan 3, yaitu beban servis tanpa faktor pengali 1D + 1L (Ramadiasri Putra et al., 2025), dan dievaluasi pada segmen 1 sebagai perwakilan kondisi kritis.

Mengacu pada AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2024) Pasal 5.8.5 (American Association of State Highway and Transportation, 2024), batas tegangan tarik izin pada kondisi servis untuk tegangan tarik utama ditetapkan tidak melebihi persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{t,izin} = 0{,}33\sqrt{f_c'} \tag{2}$$

Denggan nilai $f_c' = 50$ MPa,

diperoleh tegangan tarik izin servis sebesar 2,33 MPa. Berdasarkan hasil perhitungan, tegangan tarik utama tanpa mempertimbangkan pengaruh gaya angker diperoleh sebesar $\sigma_t = 1{,}179$ MPa, sehingga kriteria $\sigma_{t,izin} \leq 2{,}33$ MPa terpenuhi.

Selanjutnya, kontribusi gaya pengangkeraan tendon prategang dipertimbangkan karena dapat menambah tegangan, khususnya meningkatkan komponen tegangan geser di zona angker. Tegangan geser akibat pengangkeraan dihitung menggunakan persamaan:

$$\tau_p = \frac{1{,}3\,\lambda\,P}{b_w\,h} \tag{3}$$

dengan faktor koreksi:

$$\lambda = 1 - \frac{A_t}{A} - \frac{e_p\,d_t\,A_t}{I} \tag{4}$$

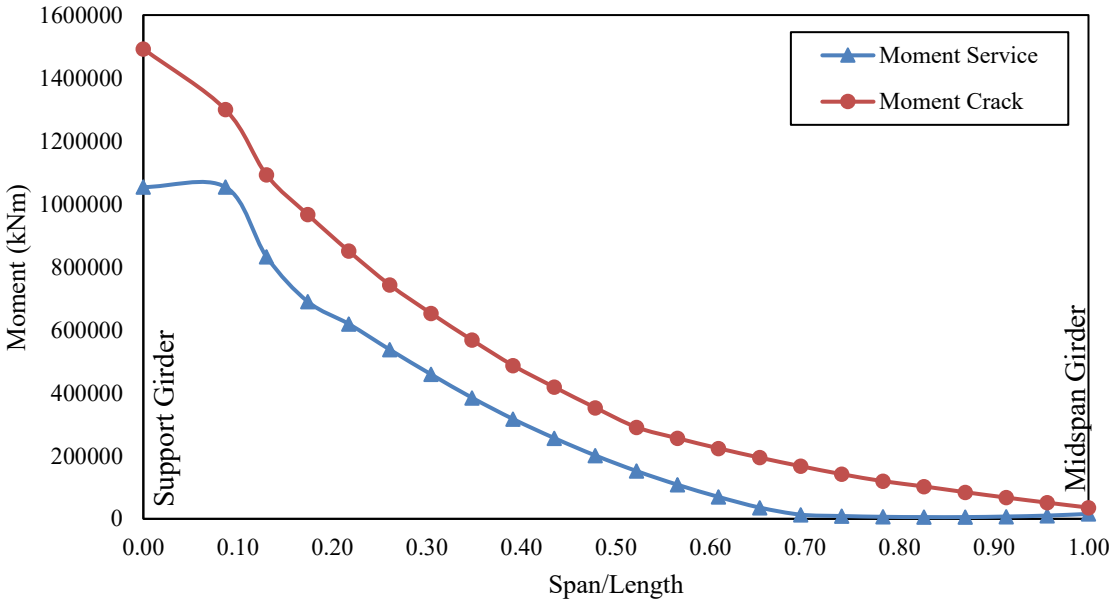
**Tabel 2.** Rekapitulasi Tegangan Tarik Utama

| $e_p$ (m) | $I_g$ ($m^4$) | $b_w$ (m) | h (m) | λ (-) | $\tau_p$ (MPa) | $\tau_v$ (MPa) | $\tau_{tot}$ (MPa) | $\sigma_t$ (MPa) | $\sigma_{t,izin}$ (MPa) | Kontrol |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4,00 | 189,32 | 1,00 | 7,34 | 0,35 | 0,23 | 3,41 | 3,63 | 1,32 | 2,33 | Aman |
| 3,86 | 173,07 | 1,00 | 7,09 | 0,34 | 0,91 | 3,28 | 4,18 | 1,67 | 2,33 | Aman |
| 3,65 | 151,21 | 1,00 | 6,73 | 0,32 | 0,46 | 3,20 | 3,65 | 1,43 | 2,33 | Aman |
| 3,45 | 131,99 | 1,00 | 6,39 | 0,31 | 0,46 | 3,11 | 3,57 | 1,41 | 2,33 | Aman |
| 3,26 | 115,03 | 1,00 | 6,06 | 0,29 | 0,46 | 3,01 | 3,47 | 1,39 | 2,33 | Aman |
| 3,12 | 98,19 | 1,00 | 5,75 | 0,25 | 0,41 | 2,88 | 3,29 | 1,32 | 2,33 | Aman |
| 2,96 | 84,86 | 0,85 | 5,46 | 0,22 | 0,45 | 3,32 | 3,76 | 1,67 | 2,33 | Aman |
| 2,81 | 73,44 | 0,75 | 5,19 | 0,19 | 0,45 | 3,56 | 4,02 | 1,90 | 2,33 | Aman |
| 2,64 | 63,44 | 0,75 | 4,93 | 0,16 | 0,41 | 3,34 | 3,76 | 1,76 | 2,33 | Aman |
| 2,50 | 55,23 | 0,70 | 4,69 | 0,12 | 0,35 | 3,33 | 3,68 | 1,74 | 2,33 | Aman |
| 2,34 | 48,60 | 0,70 | 4,47 | 0,11 | 0,33 | 2,93 | 3,26 | 1,48 | 2,33 | Aman |
| 2,18 | 42,84 | 0,65 | 4,27 | 0,11 | 0,18 | 2,86 | 3,04 | 1,42 | 2,33 | Aman |
| 2,04 | 37,83 | 0,65 | 4,08 | 0,10 | 0,17 | 2,60 | 2,78 | 1,25 | 2,33 | Aman |
| 1,90 | 33,41 | 0,60 | 3,92 | 0,09 | 0,18 | 2,49 | 2,67 | 1,21 | 2,33 | Aman |
| 1,75 | 29,43 | 0,60 | 3,77 | 0,09 | 0,19 | 2,23 | 2,42 | 1,05 | 2,33 | Aman |
| 1,60 | 25,68 | 0,55 | 3,63 | 0,09 | 0,21 | 2,14 | 2,36 | 1,04 | 2,33 | Aman |
| 1,44 | 22,10 | 0,45 | 3,52 | 0,09 | 0,27 | 2,25 | 2,52 | 1,20 | 2,33 | Aman |
| 1,31 | 19,18 | 0,45 | 3,42 | 0,08 | 0,24 | 1,84 | 2,08 | 0,91 | 2,33 | Aman |
| 1,27 | 18,11 | 0,45 | 3,34 | 0,05 | 0,15 | 1,37 | 1,52 | 0,58 | 2,33 | Aman |
| 1,25 | 17,31 | 0,45 | 3,28 | 0,04 | 0,12 | 0,84 | 0,96 | 0,31 | 2,33 | Aman |
| 1,23 | 16,75 | 0,45 | 3,24 | 0,04 | 0,12 | 0,45 | 0,56 | 0,14 | 2,33 | Aman |
| 1,22 | 16,43 | 0,45 | 3,21 | 0,03 | 0,11 | 0,26 | 0,37 | 0,09 | 2,33 | Aman |
| 1,21 | 16,32 | 0,45 | 3,20 | 0,04 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,16 | 2,33 | Aman |

di mana $P$ adalah gaya pengangkeraan tendon, $A_t$ luas penampang di atas web, $e_p$ eksentrisitas tendon terhadap pusat berat penampang, $d_t$ jarak vertikal antara titik berat penampang di atas web dan penampang girder, $I$ momen inersia penampang, $b_w$lebar web, dan $h$tinggi penampang. Pada segmen 1, dengan $P = 3661{,}22$ kN diperoleh $\lambda = 0{,}348$ dan $\tau_p = 0{,}23$ MPa. Dengan demikian, tegangan geser total yang bekerja (gabungan tegangan geser lentur dan tegangan geser akibat angker) menjadi sebesar 3,63 MPa. Setelah pengaruh ini diperhitungkan, tegangan tarik utama meningkat menjadi $\sigma_t = 1{,}322$ MPa. Namun nilai

tersebut masih lebih kecil daripada tegangan tarik izin servis sebesar 2,33 MPa, sehingga kontrol tegangan tarik utama dengan mempertimbangkan pengaruh gaya angker tetap memenuhi persyaratan, dan struktur dinyatakan aman pada tahap servis.

Berdasarkan Tabel 2, nilai $\sigma_t$ maksimum pada segmen yang ditinjau adalah 1,9 MPa, masih lebih kecil daripada $\sigma_{t,\text{izin}} = 2{,}33$ MPa. Dengan demikian, kontrol tegangan tarik utama pada tahap servis termasuk pengaruh tegangan geser akibat angker memenuhi persyaratan.




**Gambar 12.** Perbandingan Momen Servis dan Momen Retak pada Tahap Servis

Gambar 12 menyajikan perbandingan antara momen lentur servis hasil analisis SAP2000 ($M_{\text{service}}$) dan momen retak ($M_{\text{crack}}$) sepanjang rasio posisi bentang ($x/L$) pada kondisi servis untuk sistem bentang menerus (continuous span). Pola kurva menunjukkan bahwa nilai momen lebih besar terjadi di dekat tumpuan (*support girder*), kemudian menurun menuju lapangan (*midspan*), yang merupakan karakteristik umum struktur menerus akibat dominasi momen negatif di daerah tumpuan dan reduksi momen ke arah lapangan. Hasil evaluasi memperlihatkan bahwa seluruh nilai $M_{\text{service}}$ berada di bawah $M_{\text{crack}}$ pada seluruh titik tinjauan, sehingga secara umum penampang masih berada pada kondisi belum mencapai ambang retak lentur pada tahap servis. Kondisi paling kritis terjadi di sekitar tumpuan, dengan $M_{\text{service}}$maksimum sekitar 1.053.672 kNm, sedangkan $M_{\text{crack}}$pada lokasi yang sama sekitar 1.492.656 kNm, yang masih memberikan cadangan sekitar 29% terhadap momen retak. Rasio terbesar $M_{\text{service}}/M_{\text{crack}}$terjadi pada $x/L \approx 0{,}13$dengan nilai sekitar 0,71, namun tetap tidak melampaui batas retak. Ke arah lapangan (misalnya $x/L \geq 0{,}70$), nilai $M_{\text{service}}$menurun hingga berada pada kisaran 13.338–15.636 kNm, sementara $M_{\text{crack}}$tetap lebih tinggi, sehingga margin keamanan terhadap retak semakin meningkat. Temuan ini mengindikasikan bahwa pada kondisi layanan, box girder memiliki cadangan momen yang memadai terhadap terjadinya retak lentur, sehingga kekakuan penampang cenderung tetap terjaga dan mendukung kinerja lendutan layanan yang stabil.

## 3.3. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Pertama, analisis difokuskan pada respons struktur atas box girder dan pilar, sedangkan perilaku interaksi tanah–struktur pada sistem fondasi belum dimodelkan secara rinci. Kondisi batas pada pilecap diasumsikan sebagai tumpuan jepit sehingga deformasi tanah, fleksibilitas tiang bor, dan pengaruh kekakuan tanah lateral tidak menjadi variabel utama dalam analisis. Asumsi ini memberikan penyederhanaan yang wajar untuk mengevaluasi respons superstruktur, tetapi pada tahap desain lanjutan diperlukan pemodelan fondasi yang lebih komprehensif.

Kedua, penelitian ini belum melakukan analisis hidraulik secara detail terhadap perubahan pola aliran Sungai Progo akibat pengurangan jumlah pilar. Kajian ini menempatkan reduksi jumlah pilar sebagai pertimbangan awal untuk meminimalkan gangguan aliran, tetapi evaluasi lebih lanjut menggunakan pemodelan hidraulik dua dimensi atau tiga dimensi masih diperlukan untuk memastikan perubahan kecepatan aliran, potensi gerusan lokal, dan stabilitas dasar sungai di sekitar pilar.

Ketiga, analisis kehilangan prategang dalam penelitian ini dipertimbangkan untuk mengevaluasi respons layanan, tetapi belum dikembangkan sebagai analisis time-dependent yang sangat rinci. Pada struktur beton prategang bentang panjang, pengaruh rangkak, susut, relaksasi tendon, dan redistribusi gaya dalam akibat perubahan sistem struktur dapat berkembang secara bertahap selama umur layanan. Oleh karena itu, analisis jangka panjang yang lebih detail tetap diperlukan untuk memperoleh prediksi lendutan dan tegangan layanan yang lebih konservatif.

Keempat, model numerik yang digunakan merupakan idealisasi struktur. Elemen shell, tendon element, rigid link, serta kondisi sambungan monolit digunakan untuk merepresentasikan perilaku utama jembatan. Namun, kondisi lapangan seperti toleransi pengecoran, ketidakseimbangan beban form traveller, variasi mutu beton, ketidaktepatan elevasi segmen, dan deviasi gaya stressing tendon dapat memengaruhi respons aktual struktur. Oleh sebab itu, hasil analisis perlu didukung oleh kontrol mutu dan monitoring lapangan pada tahap pelaksanaan.

## 3.4. Implikasi Konstruksi

Hasil analisis tahap kantilever menunjukkan bahwa lendutan maksimum masih jauh berada di bawah batas izin L/400. Meskipun demikian, dalam pelaksanaan balanced cantilever, kontrol deformasi tetap menjadi aspek yang sangat penting karena setiap segmen yang dicor akan memengaruhi geometri akhir jembatan. Oleh karena itu, hasil analisis perlu diterjemahkan ke dalam rencana camber, kontrol elevasi segmen, dan prosedur monitoring deformasi selama pelaksanaan. Pengukuran elevasi sebaiknya dilakukan secara berkala pada setiap tahap pengecoran dan setelah stressing tendon untuk memastikan bahwa respons aktual masih sesuai dengan prediksi numerik.

Selain kontrol lendutan, urutan pengecoran dan stressing tendon juga perlu dijaga agar keseimbangan kantilever tidak terganggu. Ketidakseimbangan beban antara sisi kiri dan kanan pilar dapat meningkatkan momen sementara pada daerah *pier table* dan menghasilkan rotasi yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pelaksanaan segmen perlu mengikuti urutan konstruksi yang telah dimodelkan dalam staged construction. Beban form traveller, berat beton segar, peralatan kerja, dan beban sementara lainnya juga perlu dikendalikan agar tidak melampaui asumsi pembebanan pada model.

Pada zona angker tendon, hasil evaluasi tegangan tarik utama menunjukkan bahwa tegangan masih berada di bawah batas izin. Namun, zona ini tetap perlu mendapatkan perhatian khusus karena konsentrasi gaya prategang dapat menimbulkan tegangan lokal yang tinggi. Detailing tulangan bursting dan spalling, mutu grouting tendon, serta prosedur stressing harus dikontrol dengan baik untuk mencegah retak lokal dan kehilangan prategang yang berlebihan.

### 3.5. Implikasi Pemeliharaan Jangka Panjang

Pada tahap servis, hasil analisis menunjukkan bahwa lendutan, tegangan tarik, tegangan tarik utama, dan momen servis masih memenuhi kriteria layanan. Temuan ini mengindikasikan bahwa struktur memiliki cadangan kinerja yang memadai pada kondisi awal layanan. Namun, untuk menjamin performa jangka panjang, diperlukan strategi pemeliharaan yang berfokus pada pemantauan lendutan, retak, kondisi tendon, dan zona angker.

Pemantauan lendutan perlu dilakukan secara periodik, terutama pada daerah lapangan bentang panjang dan sekitar pilar. Perubahan lendutan yang meningkat secara signifikan dapat menjadi indikasi adanya pengaruh rangkak, susut, kehilangan prategang, atau degradasi kekakuan penampang. Selain itu, inspeksi visual terhadap retak lentur dan retak diagonal pada web perlu dilakukan secara rutin karena retak pada box girder prategang dapat memengaruhi durabilitas, terutama jika memungkinkan masuknya air dan mempercepat korosi tendon atau tulangan.

Zona angker dan daerah sekitar pier table juga perlu menjadi prioritas inspeksi karena daerah tersebut menerima kombinasi gaya prategang, momen negatif, dan tegangan lokal yang tinggi. Pemeriksaan terhadap kondisi drainase, sambungan, permukaan beton, dan potensi rembesan air pada box girder juga penting untuk menjaga durabilitas struktur. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya berimplikasi pada desain awal, tetapi juga memberikan dasar teknis bagi penyusunan rencana inspeksi dan pemeliharaan jembatan selama masa layanan.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan ulang dan evaluasi numerik pada modifikasi bentang tengah Jembatan Pandansimo STA 0+800–STA 1+475 menggunakan sistem box girder beton prategang tipe twin box dengan metode balanced cantilever cast in situ, alternatif desain ini dinilai layak diterapkan dari aspek konstruktabilitas dan kinerja layanan. Modifikasi konfigurasi penyangga menjadi 5 pilar utama dan 2 pilar penghubung berpotensi mengurangi jumlah elemen penyangga pada alur Sungai Progo, sehingga gangguan terhadap aliran sungai dan kebutuhan scaffolding masif di atas sungai dapat diminimalkan. Pada tahap konstruksi kondisi kantilever, respons struktur masih berada dalam batas yang dipersyaratkan. Tegangan serat atas dan bawah tetap terkendali, sedangkan lendutan maksimum sebesar 50,20 mm masih lebih kecil daripada batas izin L/400 sebesar 170 mm. Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai selama proses erection, dengan deformasi yang masih dapat dikendalikan melalui pengaturan camber, kontrol elevasi segmen, serta pengawasan urutan pengecoran dan penegangan tendon. Pada tahap operasional, kinerja layan struktur juga memenuhi persyaratan. Lendutan maksimum sebesar 14,80 mm masih berada di bawah batas izin L/800 sebesar 175,93 mm. Tegangan tarik maksimum pada serat bawah dan serat atas masing-masing sebesar 1,0 MPa dan 0,8 MPa, lebih rendah daripada batas tegangan tarik izin 2,33 MPa. Selain itu, tegangan tarik

utama, termasuk pengaruh tegangan geser akibat gaya angker tendon, masih berada di bawah batas izin, sehingga risiko retak diagonal pada web dapat dinyatakan terkendali. Evaluasi momen servis terhadap momen retak menunjukkan bahwa momen servis masih berada di bawah momen retak di sepanjang bentang, sehingga penampang cenderung tetap berada pada kondisi belum retak pada tahap operasional. Dengan demikian, alternatif box girder beton prategang dengan metode balanced cantilever mampu memenuhi kriteria kinerja tahap konstruksi dan operasional. Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan analisis interaksi tanah–struktur pada fondasi, pemodelan hidraulik terhadap perubahan pola aliran dan potensi gerusan lokal, analisis kehilangan prategang jangka panjang, serta evaluasi dinamik dan seismik untuk memastikan kinerja struktur pada kondisi beban ekstrem.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung oleh PT. ADHI - SWS KSO melalui penyediaan data teknis dan pemberian akses lapangan yang sangat membantu pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation. (2024). LRFD Bridge Design Specifications (10th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.

Asri, M., Passalli, A., Darmawan, I., & Djamro, A. (2024). Cost And Time Of Girder Erection Work With The Launcher Method On The Project Train Bridge Construction Api CT 406 In Maros District Biaya Dan Waktu Pekerjaan Erection Girder Dengan Metode Launcher Pada Pengumpulan data adalah kegiatan yang dilakukan guna. Jurnal Sains Dan Teknologi, 4(2), 10–24.

Balai Besar Pelaksaan Jalan Nasional Jawa Tengah - DI Yogyakarta. (2024). Jembatan Pandansimo : Desain Mewah dengan Ornamen Budaya Jawa. Https://Binamarga.Pu.Go.Id. https://binamarga.pu.go.id/balai-jateng-diy/berita/jembatan-pandansimo-desain-mewah-dengan-ornamen-budaya-jawa-

Carlie, M., & Akbar, S. (2021). Long-term deformation of balanced cantilever bridges due to uneven creep and shrinkage. In KTH Royal Institute of Technology. http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-300449

CEB, C. E.-I. D. B. (2010). CEB-FIP Model Code 2010 for Concrete Structures. Comité Euro-International Du Béton (CEB) Lausanne, Switzerland.

Computers & Structures, I. (2025). CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE, and CSiBridge. www.csiamerica.com

Fauzan Ibrahim, M., & Kholiq, A. (2023). Metode Pelaksanaan Abutment Jembatan Cipelang A pada Pekerjaan Jalan Tol Cileunyi - Sumedang - Dawuan (Cisumdawu) STA 55+200. Jurnal Teknik Sipil, 5(1), 1–7.

He, J., Li, X., Li, C., Correia, J. A. F. O., Xin, H., & Zhou, M. (2020). A novel asynchronous-pouring-construction technology for prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs. Structures, 27, 1940–1950. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.077

Isnaeni, S., & Herzanita, A. (2022). Analisis Manajemen Risiko pada Pekerjaan Box Girder Cast In-Situ Studi Kasus Proyek Pembangunan Kereta Cepat Jakarta-Bandung Stasiun Halim. Jurnal Artesis, 2(2), 175–184.

Janizar, S., Habdullah, H., Setiawan, F., & Ampearawan Schipper, L. (2022). PERENCANAAN JEMBATAN CABLE STAYED 200 METER (Studi Kasus : Jembatan Cijambe Garut). Jurnal Teknik Sipil Cendekia (Jtsc), 3(1), 43–59. https://doi.org/10.51988/jtsc.v3i1.45

Kementerian PUPR. Dirjen Bina Marga. (2021). Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan.

In Panduan Bidang Jalan dan Jembatan. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Direktorat Jenderal Bina Marga.

Kraľovanec, J., Bahleda, F., Prokop, J., Moravčík, M., & Neslušan, M. (2021). Verification of Actual Prestressing in Existing Pre-Tensioned Members. Applied Sciences, 11(13), 5971. https://doi.org/10.3390/app11135971

Liu, Z., Zhao, K., Xiong, Y., & Wang, B. (2024). Calculation method of temporary cable force in incremental launching construction of large span steel box girder without auxiliary pier. Scientific Reports, 14(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-71725-4

Maldar, M., Kianoush, M. R., & Lachemi, M. (2024). Time-dependant effects on curved precast segmentally constructed balanced cantilever bridges. Engineering Structures, 310, 118147. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118147

Nugroho, L., Haryanto, Y., Hu, H.-T., Hsiao, F.-P., Pamudji, G., Setiadji, B. H., Hsu, C.-N., Weng, P.-W., & Lin, C.-C. (2025). Prestressed Concrete T-Beams Strengthened with Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rods Under Monotonic Loading: A Finite Element Analysis. Eng, 6(2), 36. https://doi.org/10.3390/eng6020036

Permata, S. (2025). Evaluasi Lendutan Balok Beton Bertulang dengan Pendekatan Matematis : Penerapan Teori Euler – Bernoulli Terhadap Batas Kemampuan Layan. Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa, 20(2), 67–74.

Purba, L., Supriyadi, B., & Suhendro, B. (2022). Effect Of Creep On The Long-Term Deflection Of Box Girder Balanced Cantilever Bridge Structure Using B3 Model and CEB 2010. Journal of the Civil Engineering Forum, 91–100. https://doi.org/10.22146/jcef.4905

Ramadiasri Putra, P., Oetomo, W., & Marleno, R. (2025). A Comparative Analysis of Cantilever and Gravity Retaining Wall Dimensions on The Temuireng-Jetis Road Section In Mojokerto District. Journal of Social Research, 4(2), 209–216. https://doi.org/10.55324/josr.v4i2.2425

Walujodjati, E., & Eka Cahya Gumilar. (2022). Analisis Kapasitas Box Girder pada Jembatan. Jurnal Konstruksi, 20(1), 126–138. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-1.1035

Yudoprasetyo, K., Hariyanto, I. R., Rosyidi, M. F., & Manwaroh, P. Al. (2026). Aplikasi Teorema Castigliano untuk Analisis Defleksi pada Desain Jembatan Beton Prategang : Pendekatan Metode Energi untuk Evaluasi Kinerja Struktural. 4(4), 10558–10572.

Zebua, B., Batubara, S., & Ginting, M. (2022). Analisis Pengaruh Pemberian Gaya Prategang Pada Struktur Jembatan Gelagar Baja Komposit. Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS), 05, 11–21. https://doi.org/10.54367/jrkms.v5i1.1798

Zhao, Y., Fu, Y., Zhu, Y., & Su, B. (2024). Reliability Analysis of Degraded Suspenders of Long-Span Suspension Bridge under Traffic Flow Braking. Buildings, 14(8), 2333. https://doi.org/10.3390/buildings14082333