



Modifikasi Jembatan Jurug-B dengan *Box Girder* Beton Prategang *Balanced Cantilever*

Kohar Yudoprasetyo¹, Muhammad Sigit Darmawan¹, Ifarrel Rachmanda Hariyanto¹, Rayhan Aufa Rahman¹

¹Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

Keywords :

Balanced Cantilever; Box Girder; Prestressed Concrete; Structure Modification; Tendon

Abstract

Jurug-B Bridge connects Surakarta City and Karanganyar Regency and replaces an existing Callender Hamilton bridge that has exceeded its design service life. This study evaluates a 169 m prestressed concrete multi-cell box girder using the cast-in-situ balanced cantilever method. Structural analysis was performed using SAP2000 with shell elements and tendon loads, supported by manual verification. The evaluation covered stresses, deflection, principal web stresses, shear, and dynamic characteristics. Maximum compressive and tensile stresses were 16.78 MPa and 1.50 MPa during the cantilever stage and 12.24 MPa and 0.97 MPa in the continuous stage, all below allowable limits. Construction and service deflections were 63 mm and 23.8 mm. Maximum principal tensile and compressive stresses were 1.29 MPa and 11.68 MPa, while the critical shear ratio was 0.75. The first vertical natural frequency was 2.635 Hz with 99% cumulative mass participation, confirming adequate structural performance.

Kata Kunci :

Balanced Cantilever; Beton Prategang; Box Girder; Modifikasi Struktur; Tendon

Abstrak

Jembatan Jurug-B menghubungkan Kota Surakarta dan Kabupaten Karanganyar serta menggantikan jembatan eksisting Callender Hamilton yang telah melampaui umur rencana. Penelitian ini mengevaluasi rancangan *box girder* beton prategang *multi-cell* sepanjang 169 m dengan metode *cast-in-situ balanced cantilever*. Analisis struktur dilakukan menggunakan SAP2000 dengan elemen *shell* dan beban tendon, serta diverifikasi melalui perhitungan manual. Evaluasi meliputi tegangan, lendutan, tegangan utama *web*, geser, dan karakteristik dinamis. Tegangan tekan dan tarik maksimum pada tahap kantilever sebesar 16,78 MPa dan 1,50 MPa, sedangkan pada tahap bentang menerus sebesar 12,24 MPa dan 0,97 MPa, seluruhnya di bawah batas izin. Lendutan tahap konstruksi dan layanan masing-masing sebesar 63 mm dan 23,8 mm. Tegangan tarik dan tekan utama maksimum sebesar 1,29 MPa dan 11,68 MPa, dengan rasio geser kritis 0,75. Frekuensi natural vertikal pertama sebesar 2,635 Hz dan partisipasi massa kumulatif 99%, sehingga rancangan memenuhi kriteria kinerja struktur yang ditinjau.

Article History :

Submitted : 11 June 2026
Accepted : 4 August 2026
Available Online : 8 August 2026

Korespondensi Penulis :
Kohar Yudoprasetyo

Sitasi: Yudoprasetyo, K., Darmawan, M. S., Hariyanto, I. R., & Rahman, R. A. (2026). Modifikasi Jembatan Jurug-B dengan *Box Girder* Beton Prategang *Balanced Cantilever*. *Composite: Journal of Civil Engineering*, 5(1), 41–52. <https://doi.org/10.26905/cjce.v5i1.17264>

Email :

kohar.yudo@its.ac.id

© 2026 Composite: Journal of Civil Engineering

This is an open access article distributed under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan infrastruktur vital dalam menjaga konektivitas jaringan jalan, terutama pada wilayah yang dipisahkan oleh sungai, lembah, atau hambatan alam lainnya (Kosim & Supartono, 2020). Salah satu infrastruktur strategis tersebut adalah Jembatan Jurug yang menghubungkan Kota Solo dan Kabupaten Karanganyar. Jembatan eksisting dibangun sejak tahun 1970 menggunakan sistem Callender Hamilton (CH), memiliki tiga pilar dan dua abutment, serta telah melampaui umur rencana rata-rata 50 tahun (Kementerian Pekerjaan Umum, 2023). Kondisi tersebut menuntut adanya penggantian struktur. Selain itu, posisi jembatan pada alur Sungai Bengawan Solo perlu diperhatikan karena perubahan debit sungai dapat meningkatkan risiko gerusan lokal atau scouring di sekitar pilar, sehingga metode pelaksanaan yang meminimalkan pekerjaan di tengah sungai menjadi penting (Feisal et al., 2018).

Alternatif struktur yang dapat diterapkan adalah *box girder* beton prategang dengan metode *cast in situ balanced cantilever*. Sistem *box girder* memiliki kekakuan lentur dan torsi yang baik, efisien untuk bentang menengah hingga panjang, serta sesuai untuk lokasi sungai karena pelaksanaan menggunakan *form traveller* dapat mengurangi kebutuhan perancah penuh di alur sungai (Kurniawandy et al., 2025). Pada penelitian ini, alternatif tersebut diterapkan pada rancangan Jembatan Jurug-B sepanjang 169 m, lebar 11,8 m, dengan penampang *box girder multi-cell* dan tinggi bervariasi dari 5,00 m pada daerah *pier head* hingga 2,025 m pada segmen *closure*.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas desain jembatan *box girder* prategang dan metode *balanced cantilever*. Kosim dan Supartono (2020) membahas analisis jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever*. Literatur internasional juga menunjukkan bahwa jembatan segmental *balanced cantilever* perlu dianalisis dengan memperhatikan tahapan konstruksi, perubahan sistem struktur, karakteristik penampang, serta efek gaya prategang. Liang et al. (2026) menegaskan pentingnya analisis perilaku lentur, geser, torsi, distorsi penampang, dan distribusi beban pada *box girder*. Galassi Sconocchia et al. (2024) menunjukkan bahwa tahapan konstruksi dan fenomena jangka panjang berpengaruh terhadap tegangan dan deformasi jembatan *box girder* pascatarik, sedangkan Maldar et al. (2024) menunjukkan bahwa efek *time-dependent*, gaya sekunder, dan torsi dapat memengaruhi tegangan utama serta potensi retak diagonal pada *web*. Pada aspek verifikasi lendutan, Yudoprasetyo et al. (2026) menunjukkan bahwa Teorema Castigliano sebagai metode energi dapat digunakan untuk memverifikasi hasil analisis numerik/FEM pada jembatan beton prategang.

Berdasarkan kajian tersebut, gap penelitian ini terletak pada masih terbatasnya kajian redesign jembatan eksisting tipe CH yang telah melampaui umur rencana menjadi struktur *box girder* beton prategang *multi-cell cast in situ balanced cantilever*, khususnya pada lokasi sungai besar. Penelitian sebelumnya umumnya membahas desain jembatan baru, variasi penampang, atau evaluasi perilaku struktur secara terpisah, tetapi belum banyak yang mengintegrasikan evaluasi tahapan konstruksi, konfigurasi tendon, kontrol tegangan utama web, lendutan, geser, torsi, respons dinamis, serta verifikasi hasil pemodelan SAP2000 terhadap perhitungan manual.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan alternatif desain Jembatan Jurug-B menggunakan *box girder* beton prategang *multi-cell cast in situ balanced cantilever* yang dievaluasi melalui integrasi pemodelan SAP2000 dan perhitungan manual. Penelitian ini diarahkan untuk menghasilkan rancangan alternatif yang memenuhi kriteria desain struktur atas dan metode pelaksanaan, dengan fokus pada kontrol tegangan, lendutan, geser, torsi, tegangan utama web, respons dinamis, serta kesesuaian pola distribusi tegangan antara hasil analisis numerik dan perhitungan manual.

2. Metode Penelitian

Data umum jembatan

Penelitian ini dilakukan pada rancangan penggantian Jembatan Jurug-B yang menghubungkan Kota Solo dan Kabupaten Karanganyar, dengan objek kajian berupa alternatif struktur *box girder prestressed concrete multi-cell cast in situ balanced cantilever* sepanjang 169 m. Data yang digunakan meliputi gambar rencana, geometri jembatan, mutu material, konfigurasi tendon, pembebanan, serta parameter struktur bawah dan pondasi. Tahapan analisis mencakup penetapan data umum, *preliminary design* penampang, perencanaan tendon atas dan bawah, analisis pembebanan, pemodelan struktur, serta kontrol kapasitas

dan kinerja struktur berdasarkan SNI 1725:2016 dan SNI 2847:2019. Pemeriksaan struktur difokuskan pada tegangan, geser, torsi, lendutan, ragam getar, dan partisipasi massa.

Data teknis utama yang digunakan dalam pemodelan dan perhitungan berdasarkan hasil perencanaan disajikan pada Tabel 1.

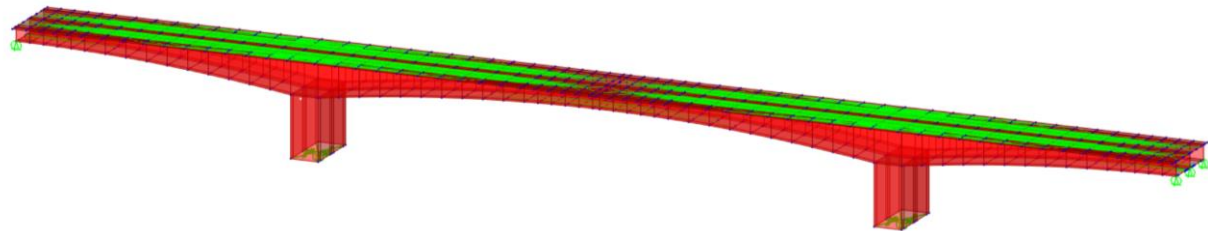
Tabel 1. Data Umum Jembatan

Parameter	Nilai
Jenis jembatan	Box girder beton prategang multi-cell cast in situ balanced cantilever
Panjang dan lebar jembatan	169 m; lebar atas 11,8 m; 2 lajur satu arah
Jumlah box dan tinggi box	Multi-cell 2 box; tinggi 5,00 m pada pier head hingga 2,025 m pada closure
Panjang segmen	2 m pada pier head; 3 m pada segmen 1-10; 2 m pada segmen 11-15; 1,5 m pada closure
Mutu beton	50 MPa untuk box girder; 35 MPa untuk abutment, pilar, dan pilecap
Material prategang	VSL strand diameter 15,24 mm; fpu = 1.860 MPa; Estd = 195.000 MPa
Konfigurasi tendon	44 tendon atas dan 30 tendon bawah; 19 strand per tendon
Modulus elastisitas beton	Ec = 33.234 MPa untuk fc' = 50 MPa; Ec = 27.806 MPa untuk fc' = 35 MPa
Pondasi	Borepile untuk abutment dan pilar

Pemodelan struktur menggunakan SAP2000

Pemodelan struktur Jembatan Jurug-B dilakukan menggunakan SAP2000 dengan pendekatan model elemen hingga tiga dimensi. Fokus utama pemodelan diarahkan pada struktur atas box girder beton prategang yang direncanakan menggunakan metode *balanced cantilever*. Model numerik disusun untuk memperoleh respons struktur atas terhadap beban mati, beban lalu lintas, beban prategang, beban konstruksi, serta kombinasi pembebanan yang digunakan dalam proses kontrol desain. Model struktur atas yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 1. Pendekatan pemodelan elemen hingga dipilih karena penelitian terbaru pada jembatan *box girder* prategang menunjukkan bahwa respons konstruksi bertahap dan efek jangka panjang perlu direpresentasikan secara eksplisit dalam model numerik (Galassi Sconocchia et al., 2024; Giaccu et al., 2021).

Gambar 1. memperlihatkan model numerik struktur atas *box girder* yang dimodelkan secara tiga dimensi. Elemen *box girder* dimodelkan menggunakan elemen *shell* untuk merepresentasikan pelat atas, web, dan pelat bawah *box girder*. Penggunaan elemen *shell* dipilih karena penampang *box girder* memiliki perilaku lentur, geser, dan torsi yang perlu direpresentasikan secara lebih rinci dibandingkan idealisasi elemen batang satu dimensi. Seluruh elemen *shell* pada struktur atas menggunakan model material beton elastik linier dengan mutu beton $f_c' = 50$ MPa. Dengan pendekatan ini, hasil analisis menggambarkan respons struktur pada kondisi elastik, sehingga sesuai untuk evaluasi tegangan, lendutan, gaya dalam, dan distribusi respons global struktur atas.



Gambar 1. Pemodelan Struktur Jembatan

Pada model ini, *pilecap* dan *pile* tidak dimodelkan karena ruang lingkup analisis difokuskan pada evaluasi kinerja struktur atas *box girder*. Oleh karena itu, struktur bawah tidak dianalisis secara rinci dalam model elemen hingga ini. Tumpuan pada model diberikan sebagai idealisasi kondisi perletakan untuk merepresentasikan batasan gerak struktur atas dan mendukung distribusi gaya dalam pada sistem jembatan. Dengan demikian, *output* utama dari model tidak digunakan untuk mengevaluasi kapasitas *pile*, penurunan pondasi, atau respons tanah–struktur, melainkan untuk mengevaluasi perilaku struktur atas

terhadap kombinasi pembebanan yang bekerja. Secara umum, idealisasi pemodelan yang digunakan dalam SAP2000 dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Idealisasi Pemodelan Struktur pada SAP2000

Komponen Model	Idealisasi Pemodelan
Struktur atas	<i>Box girder</i> dimodelkan sebagai model tiga dimensi menggunakan elemen <i>shell</i> .
Material beton	Beton elastik linier dengan mutu $f_c' = 50$ MPa.
Tendon prategang	Gaya prategang dimasukkan berdasarkan konfigurasi tendon atas dan tendon bawah sesuai desain.
Perletakan	Kondisi tumpuan dimodelkan sebagai batasan gerak untuk merepresentasikan sistem perletakan struktur atas.
Pilecap dan pile	Tidak dimodelkan karena fokus analisis adalah kinerja struktur atas.
<i>Element release</i>	Tidak digunakan karena model mempertahankan kontinuitas struktur <i>box girder</i> .
Output analisis	Tegangan, lendutan, gaya geser, torsi, ragam getar, partisipasi massa, dan respons global struktur atas.

Tidak terdapat *release* pada elemen model karena sistem *box girder balanced cantilever* direncanakan sebagai sistem struktur kontinu. Kontinuitas elemen dipertahankan agar transfer momen, geser, dan torsi antarsegmen dapat direpresentasikan sesuai dengan perilaku struktur statis tak tentu pada kondisi akhir. Dengan tidak diberikannya *release*, model dapat menangkap redistribusi gaya dalam akibat perubahan sistem struktur dari tahap kantilever menuju sistem bentang menerus setelah segmen *closure* tersambung.

Pendekatan pemodelan ini relevan untuk mengevaluasi kinerja struktur atas Jembatan Jurug-B karena perilaku utama *box girder balanced cantilever* dipengaruhi oleh kekakuan penampang, distribusi gaya prategang, beban konstruksi, serta perubahan sistem struktur setelah segmen *closure* tersambung. Oleh karena itu, model SAP2000 digunakan sebagai dasar untuk memperoleh respons global struktur atas, sedangkan pemeriksaan detail seperti tegangan, lendutan, geser, torsi, dan respons dinamis dibahas lebih lanjut pada bagian hasil dan pembahasan.

Penelitian ini dibatasi pada evaluasi struktural struktur atas berdasarkan data desain, perhitungan manual, dan model numerik SAP2000. *Pilecap* dan *pile* tidak dimodelkan secara rinci karena fokus utama analisis diarahkan pada kinerja *box girder* beton prategang. Selain itu, analisis hidraulika gerusan lokal, prediksi *creep-shrinkage* jangka panjang, kehilangan prategang jangka panjang secara rinci, skenario kerusakan atau putus tendon internal, serta validasi melalui monitoring lapangan belum menjadi bagian dari ruang lingkup pemodelan ini. Aspek-aspek tersebut dapat dikembangkan pada penelitian lanjutan karena literatur menunjukkan bahwa parameter tendon internal dan data pemantauan lendutan lapangan dapat memengaruhi akurasi evaluasi struktur prategang dan *box girder*. (Paul et al., 2026; Suangga & Surachmat, 2026).

Pembebanan jembatan

Pembebanan jembatan ditentukan berdasarkan jenis beban yang bekerja pada struktur atas selama tahap konstruksi dan tahap layan. Beban yang diperhitungkan meliputi beban sendiri struktur, beban mati tambahan, beban *form traveller*, beban prategang, beban lalu lintas, beban rem, dan beban gempa. Seluruh beban tersebut dimasukkan ke dalam model SAP2000 sebagai *load pattern* terpisah agar pengaruh masing-masing beban terhadap respons struktur dapat dievaluasi secara terkontrol.

Beban sendiri dihitung berdasarkan luas penampang tiap segmen, panjang segmen, dan berat jenis beton. Berdasarkan hasil perhitungan, berat sendiri segmen berada pada rentang 11,71–169,80 ton, dengan nilai terbesar terjadi pada *pier box* dan nilai terkecil pada *closure segment*. Beban *form traveller* mengacu pada katalog *Dywidag Systems International*, yaitu sekitar 100 ton untuk *double-cell box* dengan kapasitas maksimum alat dan beban kerja 320 ton. Beban mati tambahan terdiri atas beban aspal sebesar 1,1 kN/m², trotoar 7,5 kN/m², tiang sandaran 7,26 kN/m, dan beban pejalan kaki 5 kN/m². Beban lalu lintas dimodelkan berdasarkan beban lajur D, beban garis terbagi 63,7 kN/m, beban truk 500 kN, serta beban rem pengendali 330,33 kN. Posisi beban lajur D dianalisis dalam empat variasi pembebanan untuk

memperoleh respons maksimum pada tahap layan (Yudoprasetyo, Darmawan, et al., 2026). Adapun ringkasan input pembebanan yang digunakan dalam analisis ditampilkan pada Tabel 3.

Kombinasi beban digunakan untuk memperoleh respons maksimum pada setiap parameter kontrol, baik pada tahap konstruksi, tahap layan, kondisi kuat, maupun kondisi ekstrem. Pada tahap konstruksi, pemeriksaan difokuskan pada pengaruh berat sendiri, gaya prategang, *form traveller*, dan gempa layan, sedangkan pada tahap layan dan kuat analisis digunakan untuk mengontrol tegangan, lendutan, geser, dan torsi setelah struktur berubah menjadi bentang menerus. Untuk beban lalu lintas, variasi posisi beban lajur D dan beban truk dianalisis secara terpisah, kemudian respons maksimumnya digunakan sebagai dasar pemeriksaan. Sementara itu, kombinasi ekstrem digunakan untuk mengevaluasi respons struktur akibat gempa arah X, arah Y, dan kombinasi ortogonal, sehingga hasil analisis yang digunakan merepresentasikan kondisi kritis pada tahap konstruksi dan kondisi layan jembatan.

Tabel 3. Ringkasan Input Pembebanan Jembatan

Jenis Beban	Simbol	Nilai/Input Utama
Beban sendiri struktur	MS	11,71–169,80 ton/segmen
Beban mati tambahan	MA	Aspal 1,1 kN/m ² ; trotoar 7,5 kN/m ² ; sandaran 7,26 kN/m
Beban pejalan kaki	TP	5 kN/m ²
<i>Form traveller</i>	FT	100 ton
Beban lajur D	TD	63,7 kN/m
Beban truk	TT	500 kN
Beban rem	TB	330,33 kN
Gaya prategang	PR	Sesuai konfigurasi tendon
Beban gempa	EQ	S _s = 0,5g; S ₁ = 0,3g; PGA = 0,25g

Tabel 4. Kombinasi Beban yang Digunakan dalam Analisis

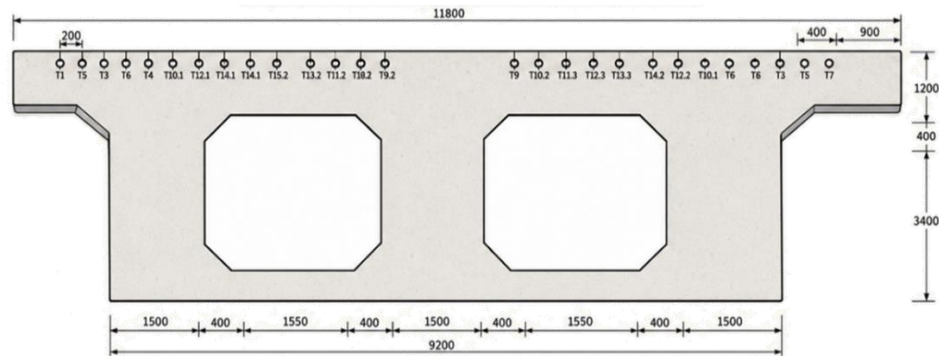
Kombinasi Beban	Komponen Beban	Tujuan Pemeriksaan
Tahap konstruksi kantilever	MS + PR + FT	Kontrol tegangan dan lendutan selama pelaksanaan <i>balanced cantilever</i>
Gempa layan tahap konstruksi	MS + PR + FT + EQ	Kontrol tegangan struktur pada tahap konstruksi akibat pengaruh gempa layan
Layan III	MS + MA + PR + TD/TT + TB	Kontrol tegangan dan lendutan pada tahap bentang menerus
Kuat I	MS + MA + PR + TD/TT + TB	Kontrol kapasitas geser dan torsi akibat kombinasi beban gravitasi dan lalu lintas
Extreme I	MS + MA + PR + EQ _x	Kontrol respons struktur akibat pengaruh gempa arah memanjang, melintang dan ortogonal

Perencanaan tendon

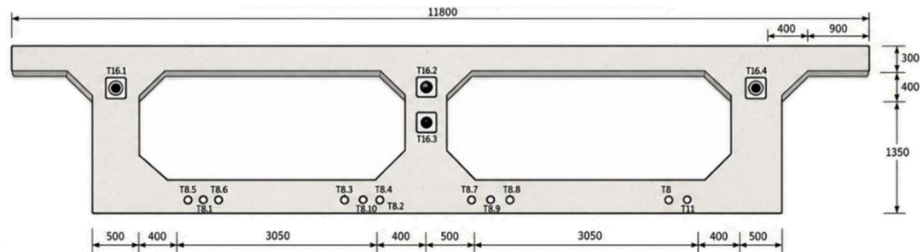
Perencanaan tendon dilakukan untuk mengimbangi momen negatif pada daerah pilar selama tahap kantilever dan momen positif pada tahap bentang menerus setelah segmen closure tersambung. Sistem prategang yang digunakan adalah VSL *Post-Tensioning* ASTM A416 dengan diameter strand 15,24 mm, luas nominal 140 mm², kuat tarik ultimit $f_{pu} = 1.860$ MPa, modulus elastisitas baja prategang $E_s = 195.000$ MPa, dan 19 strand pada setiap tendon. Berdasarkan hasil perencanaan, konfigurasi akhir menggunakan 44 tendon atas dan 30 tendon bawah.

Konfigurasi tendon menunjukkan bahwa tendon atas bekerja dominan untuk menahan momen negatif selama tahap kantilever, sedangkan tendon bawah atau *continuity tendon* bekerja setelah segmen closure tersambung untuk mengendalikan momen positif pada sistem bentang menerus. Pola tersebut sesuai dengan prinsip jembatan segmental prategang *balanced cantilever*, yaitu tendon kantilever ditempatkan untuk mengontrol tegangan pada daerah pilar selama proses pengecoran segmen, sedangkan tendon kontinuitas digunakan untuk membentuk sistem struktur menerus setelah tahap closure. Prinsip ini sejalan dengan pembahasan Kurniawandy et al. (2025) mengenai perilaku box girder berdasarkan variasi

penampang, serta Jurišić et al. (2024) yang menekankan bahwa respons regangan dan deformasi jembatan *cast-in-place balanced cantilever* dipengaruhi oleh urutan konstruksi, aktivasi tendon, dan perubahan sistem struktur.



Gambar 2. Konfigurasi Tendon Atas



Gambar 3. Konfigurasi Tendon Bawah

Pada pemodelan SAP2000, tendon dimodelkan sebagai elemen garis atau *cable line* yang mengikuti profil tendon sesuai gambar rencana. Setiap tendon diberikan gaya prategang sebagai beban prategang atau *prestressing load* dengan notasi PR. Pemodelan tendon sebagai elemen garis digunakan agar pengaruh eksentrisitas tendon terhadap distribusi gaya dalam dan tegangan pada *box girder* dapat direpresentasikan dalam model numerik. Gaya prategang yang bekerja pada tendon kemudian menghasilkan gaya aksial tekan dan momen sekunder pada penampang akibat eksentrisitas terhadap garis berat *box girder*.

Secara umum, pengaruh gaya prategang terhadap tegangan beton dapat dinyatakan melalui hubungan berikut:

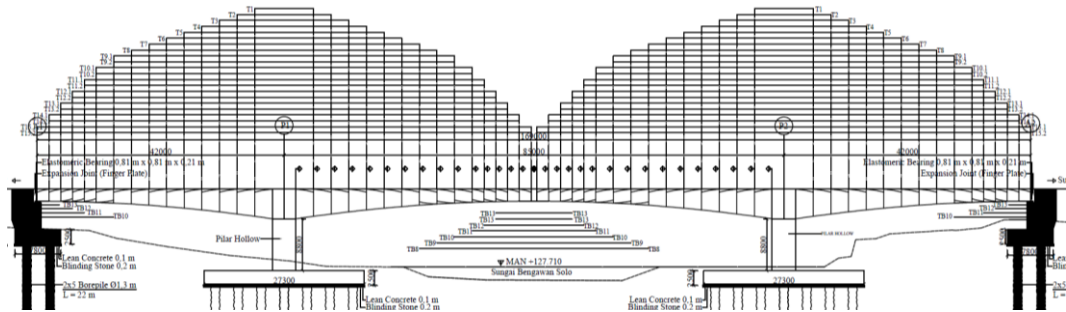
$$\sigma_p = \frac{P_{eff}}{A} \pm \frac{P_{eff} \times e \times y}{I} \quad (1)$$

dengan (P_{eff}) adalah gaya prategang efektif, (A) adalah luas penampang beton, (e) adalah eksentrisitas tendon terhadap garis berat penampang, (y) adalah jarak serat tinjauan terhadap garis berat, dan (I) adalah momen inersia penampang. Persamaan ini menunjukkan bahwa posisi tendon sangat memengaruhi distribusi tegangan pada serat atas dan serat bawah *box girder*. Oleh karena itu, profil tendon dibuat mengikuti kebutuhan momen sepanjang bentang, yaitu tendon atas lebih dominan pada daerah pilar dan tendon bawah lebih dominan pada daerah bentang.

Selain berpengaruh terhadap tegangan lentur, konfigurasi dan penempatan tendon juga perlu dikaitkan dengan potensi peningkatan tegangan utama pada *web box girder*. He et al. (2021) menjelaskan bahwa gaya angkur tendon kantilever dapat menimbulkan tambahan tegangan geser pada *web*, sehingga dapat meningkatkan tegangan utama dan berpotensi memicu retak diagonal apabila tidak dikontrol dengan baik. Oleh karena itu, pemeriksaan tegangan tarik utama dan tegangan tekan utama pada *web* menjadi bagian penting dalam penelitian ini untuk memastikan bahwa konfigurasi tendon yang digunakan tetap aman terhadap kombinasi pengaruh lentur, geser, torsi, dan konsentrasi gaya angkur.

Konfigurasi tendon prategang yang digunakan dalam perencanaan ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar tersebut memperlihatkan distribusi tendon atas dan tendon bawah sepanjang bentang Jembatan

Jurug-B. Tendon atas lebih dominan pada daerah pilar karena tahap kantilever menghasilkan momen negatif yang besar pada daerah tersebut, sedangkan tendon bawah bekerja pada tahap akhir untuk mengendalikan momen positif pada daerah bentang setelah sistem struktur menjadi menerus.



Gambar 4. Konfigurasi tendon prategang pada *box girder* Jembatan Jurug-B

3. Hasil dan Pembahasan

Kontrol tegangan tahap kantilever dan bentang menerus

Kontrol tegangan dilakukan pada dua kondisi utama, yaitu tahap kantilever selama pelaksanaan konstruksi dan tahap bentang menerus setelah segmen *closure* tersambung serta tendon bawah atau *continuity tendon* diaktifkan. Pada tahap kantilever, pemeriksaan dilakukan terhadap kombinasi beban mati, gaya prategang, beban *form traveller*, dan gempa layan. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kombinasi beban mati + prategang + *form traveller*, tegangan tekan maksimum sebesar 16,17 MPa masih lebih kecil dari batas izin 27,63 MPa, sedangkan tegangan tarik maksimum pada segmen 15 sebesar 1,28 MPa masih berada di bawah batas izin 1,56 MPa. Pada kombinasi gempa layan, tegangan tekan maksimum meningkat menjadi 16,78 MPa dan tegangan tarik maksimum menjadi 1,50 MPa, namun keduanya tetap memenuhi batas izin yang digunakan dalam perencanaan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *box girder* masih aman selama tahap kantilever, baik terhadap beban konstruksi maupun gempa layan. Tegangan tekan maksimum sekitar 61% dari batas izin menunjukkan bahwa kapasitas tekan beton masih memiliki margin keamanan yang memadai. Sementara itu, tegangan tarik akibat gempa layan relatif mendekati batas izin, sehingga urutan pengecoran segmen, aktivasi tendon atas, dan posisi beban *form traveller* tetap perlu dikendalikan selama pelaksanaan. Secara struktural, konfigurasi tendon atas terbukti efektif dalam mengimbangi momen negatif yang dominan di sekitar pilar sebelum struktur memperoleh kontribusi kontinuitas dari segmen *closure* dan tendon bawah.

Pada tahap bentang menerus, hasil analisis SAP2000 untuk kombinasi Layan III menunjukkan tegangan tekan maksimum sebesar 12,24 MPa dan tegangan tarik maksimum sebesar 0,97 MPa. Nilai tersebut masih lebih kecil dari batas izin masing-masing, yaitu 22,54 MPa untuk tekan dan 1,34 MPa untuk tarik. Rasio tegangan tekan sebesar 0,54 dan rasio tegangan tarik sebesar 0,72 menunjukkan bahwa struktur tetap memenuhi kriteria tegangan izin setelah sistem berubah dari kantilever menjadi bentang menerus. Perubahan sistem ini menghasilkan redistribusi gaya dalam yang lebih stabil karena momen tidak lagi terkonsentrasi pada sistem kantilever, tetapi telah terdistribusi ke beberapa bentang setelah segmen *closure* tersambung.

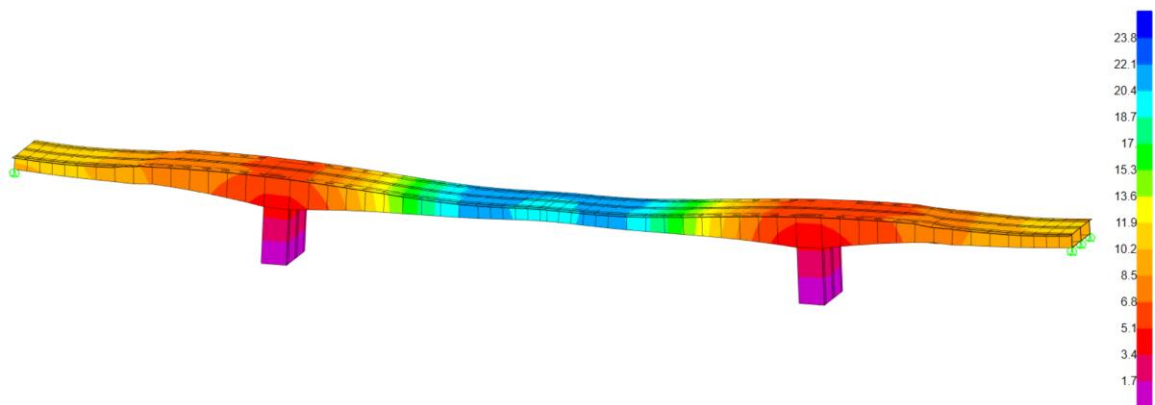
Hasil ini sejalan dengan Giaccu et al. (2021), Galassi Sconocchia et al. (2024) dan Jurišić et al. (2025), yang menekankan bahwa tahapan konstruksi, aktivasi tendon, dan perubahan sistem struktur berpengaruh terhadap distribusi tegangan, lendutan, dan deformasi pada jembatan *box girder* prategang *balanced cantilever*. Dengan demikian, hasil kontrol tegangan pada tahap kantilever dan tahap bentang menerus menunjukkan bahwa konfigurasi tendon atas dan tendon bawah telah bekerja efektif dalam mengendalikan momen negatif di daerah pilar serta momen positif di daerah bentang, sehingga desain superstruktur Jembatan Jurug-B memenuhi kriteria kinerja layan yang direncanakan.

Kontrol lendutan

Kontrol lendutan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur atas pada tahap konstruksi dan tahap layan. Berdasarkan hasil analisis SAP2000, lendutan pada tahap kantilever akibat kombinasi beban mati, gaya prategang, dan beban *form traveller* sebesar 63 mm, lebih kecil dari batas izin 210 mm. Pada tahap

bentang menerus dengan kombinasi Layan III, lendutan maksimum yang terjadi sebesar 23,8 mm, lebih kecil dari batas izin 105 mm. Dengan demikian, baik pada tahap pelaksanaan maupun pada tahap layan, lendutan struktur masih memenuhi kriteria desain yang digunakan dalam perencanaan.

Distribusi lendutan pada tahap layan ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan kontur deformasi tersebut, lendutan terbesar terjadi pada daerah bentang utama, sedangkan lendutan di sekitar pilar dan tumpuan relatif lebih kecil. Pola ini menunjukkan bahwa respons vertikal struktur didominasi oleh perilaku lentur global *box girder* pada daerah bentang. Hal ini sesuai dengan karakteristik jembatan *box girder balanced cantilever*, di mana perubahan tinggi penampang dari daerah pilar menuju segmen *closure* menyebabkan distribusi kekakuan lentur yang tidak seragam sepanjang bentang. Daerah pilar memiliki kekakuan lebih besar karena tinggi *box girder* lebih besar, sedangkan daerah bentang memiliki kekakuan relatif lebih kecil sehingga mengalami lendutan yang lebih dominan.



Gambar 5. Distribusi lendutan vertikal struktur atas akibat kombinasi beban layan

Nilai lendutan maksimum sebesar 23,8 mm pada kondisi layan masih jauh di bawah batas izin 105 mm. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi penampang *box girder* dan sistem tendon prategang mampu mengontrol deformasi vertikal struktur secara efektif setelah segmen *closure* tersambung dan sistem berubah menjadi bentang menerus. Selain itu, lendutan pada tahap konstruksi sebesar 63 mm yang masih berada di bawah batas izin 210 mm menunjukkan bahwa struktur tetap aman selama proses *balanced cantilever*, meskipun pada tahap tersebut struktur belum bekerja sebagai sistem menerus penuh.

Meskipun lendutan hasil desain masih memenuhi batas izin, hasil ini perlu ditempatkan dalam konteks perilaku jangka panjang jembatan beton prategang. Galassi Sconocchia et al. (2024) menunjukkan bahwa tahapan konstruksi, rangkai, susut, dan kehilangan prategang dapat memengaruhi deformasi serta tegangan pada jembatan *box girder* pascatarik. Oleh karena itu, hasil lendutan dalam penelitian ini dipahami sebagai kontrol desain berdasarkan kondisi analisis, sedangkan evaluasi pasca konstruksi tetap diperlukan untuk mengantisipasi perubahan respons struktur akibat efek waktu.

Kontrol tegangan tarik utama dan tekan utama

Kontrol tegangan utama dilakukan untuk mengevaluasi potensi retak diagonal pada *web box girder* akibat kombinasi tegangan lentur, geser, torsi, serta pengaruh konsentrasi gaya angkur tendon. Pemeriksaan ini penting karena pada jembatan *box girder* prategang, gaya prategang dan eksentrisitas tendon tidak hanya memengaruhi tegangan normal, tetapi juga dapat meningkatkan tegangan geser lokal pada daerah *web*. He et al. (2021) menunjukkan bahwa gaya angkur tendon kantilever dapat menimbulkan tambahan tegangan geser pada *web* jembatan segmental, sehingga perlu diperhitungkan dalam pemeriksaan kondisi layan. Ringkasan hasil kontrol tegangan utama disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan Kontrol Tegangan Utama *Web*

Parameter kontrol	Segmen kritis	Nilai maksimum (MPa)	Batas izin (MPa)	Rasio	Status
Tegangan tarik utama + geser angkur	Segmen 6	1,29	2,33	0,55	OK
Tegangan tekan utama + geser angkur	Segmen 8	11,68	22,50	0,52	OK

Berdasarkan hasil analisis, tegangan tarik utama maksimum terjadi pada segmen 6 dengan nilai 1,29 MPa, lebih kecil dari batas izin 2,33 MPa, sehingga menghasilkan rasio sebesar 0,55. Sementara itu, tegangan tekan utama maksimum terjadi pada segmen 8 dengan nilai 11,68 MPa, lebih kecil dari batas izin 22,50 MPa, dengan rasio sebesar 0,52. Kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa *web box girder* masih memiliki cadangan kapasitas yang memadai terhadap kombinasi pengaruh lentur, geser, torsi, dan gaya angkur tendon.

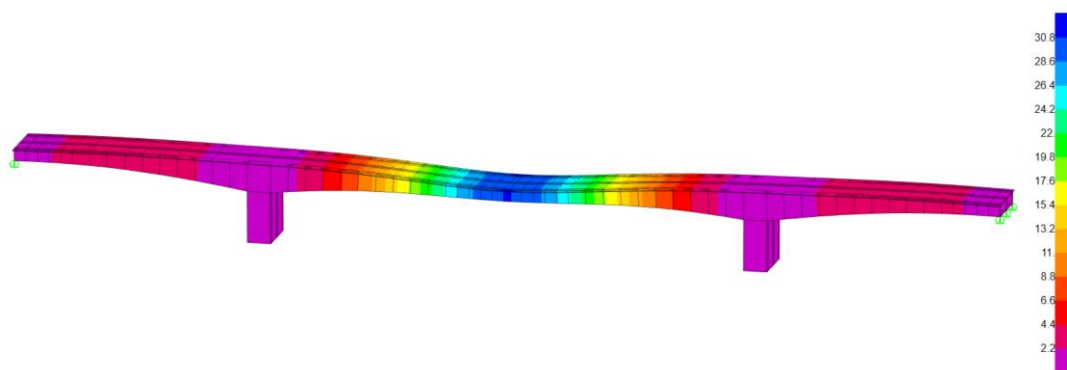
Segmen kritis yang terjadi pada segmen 6 dan segmen 8 menunjukkan bahwa daerah transisi gaya internal akibat tendon kantilever merupakan zona yang perlu diperhatikan dalam desain. Meskipun kontrol lentur dan lendutan telah memenuhi batas izin, pemeriksaan tegangan utama tetap diperlukan karena retak diagonal pada *web* dapat dipengaruhi oleh interaksi antara gaya prategang, gaya geser, dan torsi. Hasil ini sejalan dengan He et al. (2021), serta Maldar et al. (2024), yang menempatkan tegangan utama *web* sebagai salah satu parameter kritis pada jembatan *box girder* prategang dengan metode *balanced cantilever*. Dengan demikian, hasil kontrol menunjukkan bahwa desain *web box girder* pada Jembatan Jurug-B masih aman terhadap potensi retak diagonal pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

Kontrol dinamis jembatan

Kontrol dinamis jembatan dilakukan melalui analisis ragam getar menggunakan SAP2000 untuk mengevaluasi karakteristik respons dinamis struktur atas *box girder*. Jumlah ragam getar yang digunakan sebanyak 45 *mode shape* untuk memastikan partisipasi massa struktur memenuhi kriteria minimum lebih dari 90%. Berdasarkan hasil analisis, partisipasi massa kumulatif struktur mencapai 99% pada arah lateral X dan Y. Nilai tersebut menunjukkan bahwa jumlah ragam getar yang digunakan telah cukup untuk merepresentasikan respons dinamis global struktur dalam model.

Hasil analisis menunjukkan bahwa *mode shape* pertama terjadi pada arah vertikal, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Pada ragam pertama ini, diperoleh frekuensi natural sebesar 2,635 Hz. Pola deformasi pada *mode shape* 1 memperlihatkan respons dominan berupa lendutan vertikal pada bentang utama, sedangkan daerah sekitar pilar dan tumpuan menunjukkan deformasi yang relatif lebih kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kekakuan lentur vertikal struktur atas menjadi karakteristik dinamis utama pada ragam pertama.

Dominasi respons vertikal pada *mode shape* pertama menunjukkan bahwa perilaku dinamis awal struktur dipengaruhi oleh kekakuan lentur *box girder* sepanjang bentang. Hal ini sesuai dengan karakteristik jembatan *box girder balanced cantilever*, di mana variasi tinggi penampang dari daerah pilar menuju segmen *closure* menghasilkan distribusi kekakuan yang tidak seragam. Daerah sekitar pilar memiliki kekakuan lebih besar karena tinggi penampang *box girder* lebih besar, sedangkan daerah bentang memiliki kekakuan relatif lebih kecil sehingga lebih dominan mengalami deformasi vertikal.



Gambar 6. Kondisi *mode shape* 1 Arah vertikal

Hasil ini relevan dengan Jirawattanasomkul et al. (2025), yang menunjukkan bahwa frekuensi alami, bentuk ragam, regangan dinamis, dan posisi sumbu netral pada jembatan *balanced cantilever* dapat digunakan sebagai parameter penting dalam evaluasi kondisi struktur dan *structural health monitoring*. Dengan demikian, nilai frekuensi natural sebesar 2,635 Hz dan pola *mode shape* vertikal pada penelitian ini

dapat digunakan sebagai *baseline* numerik awal apabila di masa mendatang dilakukan pengukuran dinamis lapangan.

Pada konteks evaluasi gempa, Fauzan et al. (2024) menunjukkan bahwa analisis SAP2000 pada jembatan beton prategang dapat digunakan untuk membaca kinerja momen, geser, dan lendutan akibat beban gempa. Sementara itu, Meshram dan Amane (2026) menggunakan SAP2000 dan *response spectrum analysis* untuk mengevaluasi respons dinamis *box girder* prategang. Oleh karena itu, hasil kontrol dinamis pada penelitian ini menunjukkan bahwa model SAP2000 telah mampu menangkap karakteristik getaran global struktur, khususnya dominasi respons lentur vertikal pada ragam pertama dan kecukupan partisipasi massa untuk evaluasi respons lateral struktur.

Kontrol geser

Gaya geser yang timbul akibat kombinasi beban lalu lintas harus dijaga agar tidak melebihi kapasitas geser maksimum dari *box girder*. Rekapitulasi kontrol geser tiap segmen dapat dilihat pada Tabel 6.

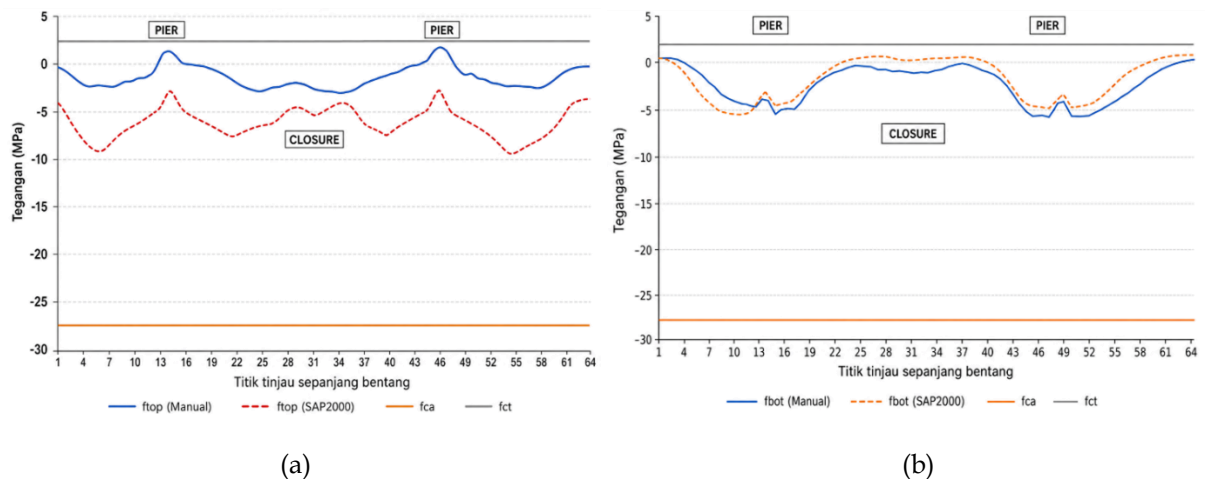
Tabel 6. Rekapitulasi Kontrol Geser

Kombinasi kritis	Segmen kritis	ϕV_{cw} (kN)	V_u (kN)	Rasio $V_u/\phi V_{cw}$	Status
Kuat I	Pier	40.167	30.107	0,75	OK
Extreme 1 X-Y	Segmen 1	45.446	24.158	0,53	OK

Rasio terbesar terjadi pada kombinasi Kuat I di daerah pier, yaitu 0,75. Nilai ini menunjukkan bahwa kapasitas geser masih lebih besar daripada gaya geser yang bekerja, sehingga penampang memenuhi persyaratan geser pada kombinasi pengendali.

Verifikasi pemodelan terhadap tegangan tarik dan tegangan tekan

Verifikasi tegangan dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan manual dan output SAP2000 pada kombinasi Layan III. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa model numerik mampu merepresentasikan distribusi tegangan pada serat atas dan serat bawah *box girder* secara konsisten terhadap pendekatan analitis. Perbandingan tegangan serat atas dan serat bawah ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Komparasi verifikasi tegangan dengan hasil analisa manual dan SAP2000; (a) tinjauan sisi atas dan (b) tinjauan sisi bawah

Berdasarkan Gambar 7, distribusi tegangan serat atas dan serat bawah hasil perhitungan manual dan SAP2000 menunjukkan pola yang relatif konsisten, terutama pada daerah pilar, bentang, dan segmen *closure*. Perubahan tegangan yang lebih signifikan terjadi di sekitar pilar akibat momen negatif dan konsentrasi gaya prategang, sedangkan pada daerah bentang dan *closure* distribusi tegangan mengikuti perubahan sistem struktur dari kantilever menjadi bentang menerus. Perbedaan nilai lokal antara hasil manual dan SAP2000 masih dapat diterima karena perhitungan manual menggunakan pendekatan penampang yang lebih sederhana, sedangkan SAP2000 mempertimbangkan kekakuan elemen, distribusi beban, eksentrisitas tendon, dan interaksi global struktur. Dengan demikian, model SAP2000 dinilai

memiliki kesesuaian pola yang baik terhadap hasil perhitungan manual dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi tegangan, lendutan, geser, torsi, serta respons dinamis struktur.

Hasil pada Gambar 7 menunjukkan bahwa model SAP2000 memiliki kesesuaian pola yang baik terhadap hasil perhitungan manual, baik pada serat atas maupun serat bawah *box girder*. Dengan demikian, model numerik dapat digunakan sebagai dasar evaluasi lanjutan terhadap tegangan, lendutan, geser, torsi, dan respons dinamis struktur. Temuan ini sejalan dengan Galassi Sconocchia et al. (2024) dan Jurišić et al. (2024), yang menekankan bahwa verifikasi model numerik terhadap pendekatan analitis atau data pengukuran penting dilakukan pada jembatan *box girder* prategang, terutama karena respons struktur dipengaruhi oleh tahapan konstruksi, aktivasi tendon, dan perubahan sistem struktur.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan alternatif desain Jembatan Jurug-B sepanjang 169 m menggunakan *box girder* beton prategang *multi-cell* dengan metode *cast-in-situ balanced cantilever*. Konfigurasi 44 tendon atas dan 30 tendon bawah, masing-masing terdiri atas 19 *strand*, mampu mengendalikan respons struktur pada tahap konstruksi dan bentang menerus. Pada tahap kantilever, tegangan tekan dan tarik maksimum sebesar 16,78 MPa dan 1,50 MPa masih berada di bawah batas izin 27,63 MPa dan 1,56 MPa. Setelah struktur menjadi bentang menerus, tegangan tekan dan tarik maksimum menurun menjadi 12,24 MPa dan 0,97 MPa, dengan rasio masing-masing 0,54 dan 0,72. Lendutan pada tahap konstruksi sebesar 63 mm dan pada kondisi layan sebesar 23,8 mm juga memenuhi batas izin masing-masing 210 mm dan 105 mm.

Kontrol tegangan utama menunjukkan nilai maksimum 1,29 MPa untuk tarik dan 11,68 MPa untuk tekan, dengan rasio terhadap batas izin masing-masing 0,55 dan 0,52, sehingga *web box girder* masih memiliki kapasitas yang memadai terhadap potensi retak diagonal. Kontrol geser menghasilkan rasio kritis 0,75, sedangkan analisis dinamis menghasilkan frekuensi natural vertikal pertama sebesar 2,635 Hz dengan partisipasi massa kumulatif 99% pada arah lateral. Perbandingan distribusi tegangan juga menunjukkan kesesuaian pola antara perhitungan manual dan SAP2000. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa rancangan struktur atas Jembatan Jurug-B memenuhi kriteria kekuatan dan layanan yang ditinjau. Penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan *creep-shrinkage*, kehilangan prategang jangka panjang, gerusan lokal, kerusakan tendon, dan validasi melalui monitoring lapangan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang struktur.

5. Daftar Pustaka

- Fauzan, Putri, P. Y., Jauhari, Z. A., Sundari, D. I., & Agista, G. A. (2024). Seismic performance evaluation and vulnerability analysis of prestressed concrete bridge in Padang Pariaman Regency, Indonesia. *GEOMATE Journal*, 27(123), 133–140.
- Feisal, M., Halim, S. F., & Hendratta, L. A. (2018). Analisis gerusan lokal pada pilar Jembatan Kuwil Kabupaten Minahasa Utara menggunakan metode empiris. *Jurnal Sipil Statik*, 6(11), 1017–1028.
- Galassi Sconocchia, G., Mariani, F., Ierimonti, L., Meoni, A., Venanzi, I., & Ubertini, F. (2024). Insights into structural assessment and long-term effects of a post-tensioned multispan concrete box girder bridge with vertically prestressed internal joints. *Structures*, 63, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106396>
- Giaccu, G. F., Solinas, D., Briseghella, B., & Fenu, L. (2021). Time-dependent analysis of precast segmental bridges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15, 13. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00445-6>
- 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>
- He, Z.-Q., Tang, M., Xu, T., Liu, Z., & Ma, Z. J. (2021). Additional shear stresses in webs of segmental concrete bridges due to anchorage of cantilever tendons. *Journal of Bridge Engineering*, 26(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001750](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001750)
- Jirawattanasomkul, T., Hang, L., Srivaranun, S., Likitlersuang, S., Jongvivatsakul, P., Yodsudjai, W., &

- Thammarak, P. (2025). Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge. *Resilient Cities and Structures*, 4, 48–66. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2025.08.001>
- Jurišić, M., Bebek, N., Čubela, D., & Harapin, A. (2024). Strain analysis on cast-in-place balanced cantilever prestressed concrete bridges during construction. *Structural Engineering International*, 34(4), 1–11. <https://doi.org/10.1080/10168664.2023.2296979>
- Jurišić, M., Bebek, N., Čubela, D., & Harapin, A. (2025). Balanced cantilever construction method in post-tensioned concrete bridges. *Structural Engineering International*, 35(2). <https://doi.org/10.1080/10168664.2024.2356559>
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2023). *Manual manajemen proyek (project management manual) KPBU kegiatan penggantian dan/atau duplikasi Jembatan Callender Hamilton di Pulau Jawa*. Kementerian PUPR.
- Kosim, W., & Supartono, D. F. X. (2020). Analisis jembatan beton prategang box girder dengan metode balanced cantilever. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(2), 389–398. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i2.6982>
- Kurniawandy, A., Dafrianto, R., Ismeddiyanto, I., Aminsya, M., & Bh, R. (2025). Analysis of box girder based on cross-sectional variations. *E3S Web of Conferences*, 677, 6004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567706004>
- Liang, Y., Hu, J., Yang, F., & Qian, H. (2026). Analysis of restrained torsional shear stress in curved box girder bridges. *Engineering Research Express*, 8(3), 35114. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ae3f7b>
- 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>
- Malm, R., & Sundquist, H. (2010). Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges. *Engineering Structures*, 32(4), 1038–1045. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.030>
- Meshram, S., & Amame, D. (2026). Seismic performance assessment of prestressed concrete box girder in elevated metro structures. *International Journal of Multidisciplinary Academic Studies and Research*, 1(3), 233–244. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19702565>
- Paul, A., Sanio, D., & Mark, P. (2026). Sensitivity study on accuracy and relevant parameters in numerical modeling of internal tendon breaks. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.70619>
- Suangga, M., & Surachmat, D. (2026). Impact of tiltmeter sensor quantity on the level of accuracy of maximum deflection estimation in simple span steel box girder bridge. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3336, Issue 1, p. 140001). <https://doi.org/10.1063/5.0334351>
- Yudoprasetyo, K., Darmawan, M. S., & Rinanda, R. P. M. A. (2026). Respons Konstruksi-Layan Box Girder Prategang Jembatan Pandansimo dengan Metode Balanced Cantilever. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 22(2 SE-Articles), 100–119. <https://doi.org/10.25077/jrs.22.2.100-119.2026>
- 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.