

Analisis dan desain modifikasi jembatan rangka busur baja dengan *fluid viscous damper* menggunakan SAP2000

Muhamad Fauzan Akbari^{a*}, Yohanes Hadi Saputra^b, Rizqi Alghiffary^c, Griselda Junianda Velantika^d, Karina Melawati Eka Putri^e, Elok Dewi Widowati^f

^{a,c,d,e,f} Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Indonesia

^b Institut Teknologi Sepuluh Noverber, Indonesia

Corresponding Author:

Email:

muhamad.fauzan.ft@upnjatim.ac.id

Keywords:

Bridge seismic performance, fluid viscous damper, SAP2000, steel arch truss, structural modification design

Received :

Revised :

Accepted :

Abstract: *The bridge design modification presented in this study focuses on implementing a steel arch truss system combined with Fluid Viscous Dampers (FVDs) to improve structural efficiency and seismic resilience. The steel arch truss enables a longer main span with fewer intermediate supports, offering construction advantages, enhanced stability, and improved aesthetics. Additionally, the integration of FVDs aims to reduce structural displacements during seismic events, thereby minimizing potential post-earthquake damage. The Sembayat Baru II Bridge in Gresik Regency connects Gresik and Lamongan, serving as a vital route for mobility and logistics. Constructed between 2015–2019, its design preceded the updated seismic code (SNI 1726:2019), creating the need for redesign to ensure safety and compliance. This study involves data collection, literature review, and structural modeling with SAP2000 in accordance with Indonesian bridge and seismic standards. The redesign adopts a single-span configuration with steel orthotropic decks, providing a lighter yet more efficient superstructure. Key structural elements include BJ55 steel orthotropic deck plates with T-profile ribs, cross girders using WF profiles, tie beams with box girders, and Macalloy suspension cables to ensure stability and strength. To improve seismic performance, Fluid Viscous Dampers (FVDs) are integrated into the structure. Analytical results show that FVDs significantly reduce seismic displacement by 3–45%, confirming their role in enhancing resilience. This research highlights the importance of integrating advanced damping devices in bridge design to meet updated codes, increase durability, and ensure reliable infrastructure performance in seismic regions.*

Copyright © 2025 POTENSI-UNDIP

1. PENDAHULUAN

Transportasi ialah elemen penting dalam mendukung aktivitas sosial-ekonomi, dengan jembatan sebagai infrastruktur utama untuk menghubungkan wilayah yang terpisah oleh sungai, lembah, atau perairan (Tiwari, Rai, and Shivangi, 2016). Jembatan merupakan struktur yang dirancang untuk menyatukan dua ruas jalan yang terpisah akibat adanya hambatan alami seperti sungai, lembah dalam, saluran irigasi, maupun saluran pembuang (Mauliana and Saputra, 2024). Di Indonesia, banyak jembatan eksisting yang menggunakan banyak pilar sepanjang bentangannya sehingga kurang efisien, sehingga menyulitkan pekerjaan konstruksi pondasi (Propika and Septiarsilia, 2020). Selain itu, posisi Indonesia berada pada zona tektonik aktif (Sunarjo, 2010), hal ini membuat jembatan rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi, terutama karena perpindahan struktur (*displacement*) yang signifikan. Sistem busur rangka baja merupakan salah satu pilihan desain jembatan yang dapat memaksimalakan panjang bentang sehingga kebutuhan tumpuan menjadi lebih sedikit (Zhang, Deng, Fang, and Ge, 2022). Keunggulan sistem busur rangka baja antara lain efisiensi penggunaan material, peningkatan kekakuan struktur, serta kemampuan menyalurkan beban secara lebih efektif (Sun et al., 2024). Selain itu, desain busur rangka baja memberikan nilai estetika yang baik, membuat jembatan terlihat lebih ikonik dan sesuai untuk wilayah dengan kondisi geografis tertentu (Arslan, 2020). Untuk meningkatkan ketahanan terhadap gempa, penggunaan Fluid Viscous Damper (FVD) telah terbukti mampu meningkatkan kinerja jembatan saat gempa (Kiral, Gurbuz, and Ustabas, 2025). Viscous damper adalah perangkat peredam yang digunakan untuk mengurangi respons dinamis struktur akibat beban gempa atau getaran lainnya (Khedmatgozar Dolati, Mehrabi, and Khedmatgozar Dolati, 2021). Penerapan viscous damper pada jembatan terbukti mampu mereduksi displacement dan gaya internal yang ditimbulkan oleh aktivitas

seismik, sehingga meningkatkan ketahanan jembatan dan mengurangi risiko kerusakan pasca-gempa (Yi, Li, and Guan, 2018). Teknologi ini telah banyak diterapkan dalam desain infrastruktur modern untuk meningkatkan kinerja seismik struktur. Namun, integrasi sistem busur rangka baja dengan FVD pada modifikasi jembatan eksisting di Indonesia masih jarang diteliti, sehingga diperlukan kajian yang lebih mendalam.

Penelitian ini berfokus pada modifikasi Jembatan Sembayat Baru II yang diasumsikan sebagai jembatan strategis di Kabupaten Gresik yang menghubungkan Gresik dengan Lamongan. Jembatan ini berperan penting dalam mendukung mobilitas dan distribusi logistik, sehingga peningkatan efisiensi struktur dan ketahanan gempa menjadi kebutuhan mendesak. Jembatan ini dibangun pada periode 2015–2019, yaitu sebelum diberlakukannya peraturan gempa terbaru SNI 1726:2019. Akibatnya, desain awalnya belum sepenuhnya mengakomodasi ketentuan beban gempa terkini, sehingga diperlukan proses *redesign* untuk menyesuaikan dengan standar terbaru dan meningkatkan keandalan seismik. Menggunakan perangkat lunak SAP2000, studi ini merancang ulang elemen struktural utama, termasuk pelat orthotropik, gelagar melintang, ikatan angin, tie beam, kabel penggantung, dan integrasi FVD sebagai peredam longitudinal. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan desain jembatan yang efisien, estetis, dan tahan gempa, sekaligus memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan desain jembatan busur rangka baja dengan peredam viskositas yang relevan bagi kondisi geotektonik Indonesia dan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan infrastruktur serupa di masa depan.

2. DATA DAN METODE

Alur Penelitian

Metodologi penelitian ini diawali dengan pengumpulan data dan studi literatur terkait desain jembatan busur baja serta penggunaan FVD. Tahap selanjutnya adalah preliminary design untuk menentukan konsep awal dan dimensi struktur, diikuti perancangan struktur sekunder menggunakan pelat orthotropik. Analisis struktur utama dilakukan dengan SAP2000 untuk mengevaluasi kinerja jembatan dengan damper. Hasil analisis dikontrol kekuatan dan kestabilannya; jika tidak memenuhi standar, desain direvisi hingga sesuai kriteria.

Penghimpunan Data dan Literatur

Pada perencanaan jembatan dalam studi ini data disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Data perencanaan jembatan

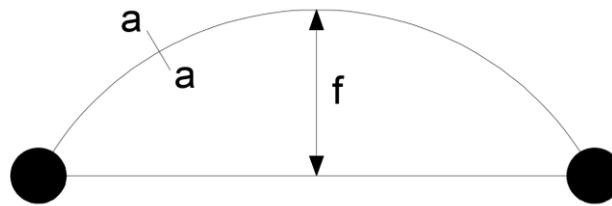
Data Perencanaan	Keterangan
Nama jembatan	Jembatan Sembayat Baru II
Lokasi	Gresik, Jawa Timur
Panjang Bentang	354 meter

Langkah berikutnya adalah melakukan tinjauan pustaka yang dilakukan dengan mengidentifikasi dan menghimpun referensi yang memiliki keterkaitan dengan rancangan struktur jembatan tipe busur. Studi literatur mencakup buku *Brockenbrough* (1994), *Wai-Fah & Duan* (2014), *Heins & Afirmage*, serta *Agus Setiawan* mengenai desain jembatan busur dan struktur baja. Beberapa standar regulasi digunakan dalam perencanaan struktur jembatan. Ketentuan mengenai jenis pembebanan yang wajib diperhitungkan, seperti beban mati, beban lalu lintas, serta pengaruh lingkungan seperti angin dan suhu, diatur dalam standar pembebanan jembatan (SNI 1725:2016). Perencanaan elemen struktur dari baja dilakukan berdasarkan metode perhitungan kekuatan dan kestabilan elemen dengan pendekatan LRFD (Load and Resistance Factor Design) yang diatur dalam standar struktur baja (SNI 1729:2015). Persyaratan teknis material beton, meliputi mutu beton, detail penulangan, dan ketentuan pembebanan, diatur dalam standar untuk beton struktural bangunan gedung (SNI 2847:2019). Selain itu, regulasi internasional yang menetapkan minimum pembebanan pada bangunan dan struktur lainnya, termasuk beban gempa dan angin dirujuk melalui standar pembebanan bangunan dan struktur (ASCE 7-16).

Desain Preliminary

Desain preliminari merupakan pendefinisian awal terkait material dan dimensi elemen struktur. Aspek tersebut meliputi penetapan ukuran elemen busur dan struktur baja, pemilihan mutu material yang

digunakan, serta kapasitas dari FVD yang diaplikasikan pada sistem struktur seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Preliminary Design Jembatan Busur : (W.-F. Chen & Duan, 2014)

Ukuran jembatan busur mencakup lebar dan tinggi keseluruhan, ketinggian penampang busur dihitung berdasarkan rumus yang terdapat pada buku Bridge Engineering Handbook (W.-F. Chen & Duan, 2014) dengan Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3.

$$\text{Lebar jembatan (b)} : \frac{b}{L} \leq \frac{1}{20} \quad \text{Pers. 1)}$$

$$\text{Tinggi fokus (f)} : \frac{1}{6} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{5} \quad \text{Pers. 2)}$$

$$\text{Tinggi penampang busur (t)} : \frac{1}{40} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{25} \quad \text{Pers. 3)}$$

Dimana b adalah lebar jembatan, f tinggi jembatan, t tinggi penampang busur, dan L panjang bentang jembatan yang digunakan untuk analisis dimensi dan kekuatan struktur.

Pembebanan

Desain preliminari merupakan pendefinisian awal terkait material dan dimensi elemen struktur. Aspek tersebut meliputi penetapan ukuran elemen busur dan struktur baja, pemilihan mutu material yang digunakan, serta kapasitas dari FVD yang diaplikasikan pada sistem struktur.

a) Dead Load / Beban Mati

Dead load / beban mati merupakan beban dari berat sendiri komponen, baik struktural maupun non-struktural, yang ditopang oleh jembatan. Perhitungan beban ini mengikuti standar (Pasal 7.2 SNI-1726:2016), data berat jenis material sesuai dengan ketentuan (Tabel 2 SNI-1725:2016). Beban dead load / beban mati dapat diperoleh dengan Persamaan 4.

$$MS = b \times h \times w \quad \text{Pers. 4)}$$

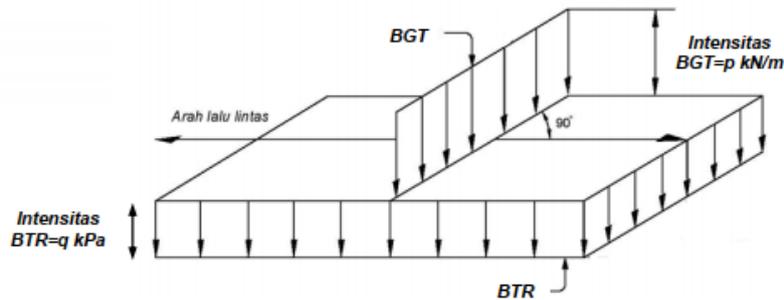
dengan, b menyatakan lebar elemen yang dianalisis (m), h adalah ketebalan elemen tersebut (m), dan w merupakan berat jenis material (kN/m^3).

b) Super Dead Load / Beban Mati Tambahan

Super dead load / beban mati tambahan ialah beban elemen non struktur pada jembatan yang dapat berubah selama masa layan, beban ini diatur dalam standar (Pasal 7.3 SNI 1726:2016). Adapun beban sendiri harus dikalikan dengan faktor beban untuk berat sendiri.

c) Beban Hidup

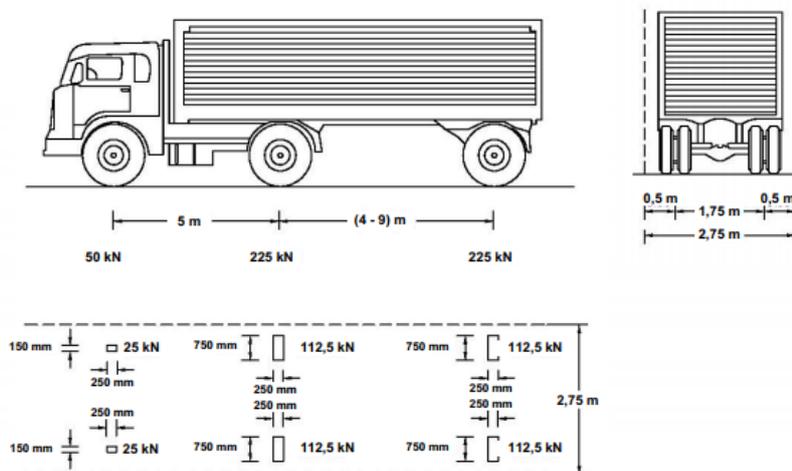
Perhitungan beban lalu lintas mencakup beban TD atau beban lajur "D", beban TT atau beban truk, gaya Tb atau gaya rem rem, dan beban TP atau beban pejalan kaki. Beban TD atau beban lajur "D" merupakan kombinasi antara beban garis (BGT) dan beban terbagi rata (BTR), dengan faktor bebannya. BTR dinyatakan sebesar q , nilainya berkaitan dengan total panjang L yang terbebani, dimana q merupakan intensitas BTR sepanjang jembatan. Beban BGT (p) diposisikan membentuk sudut 90 derajat dengan arah lalu lintas dengan menggunakan dua garis beban identik untuk memperoleh momen negatif maksimum. **Gambar 2** menggambarkan beban TD.



Gambar 2. Ilustrasi skema beban TD *Preliminary Design* Jembatan Busur (Gambar 24 Standar Nasional Indonesia 1725:2016)

Selain beban TD, jembatan juga mempertimbangkan beban lalu lintas truk "T"; namun, sesuai ketentuan *SNI 1726-2016* Pasal 8.4, kedua jenis beban tersebut tidak boleh diterapkan secara bersamaan. Beban truk "T" berupa kendaraan berat dengan tiga as yang ditempatkan pada berbagai posisi di lajur rencana. Beban tersebut dihasilkan oleh kendaraan jenis truk semi trailer yang memiliki konfigurasi serta bobot gandar tertentu, di mana tiap as dibagi menjadi dua beban merata pada bidang kontak roda dengan lantai. Pada **Gambar 3** dapat dilihat ilustrasi beban lalu lintas truk "T".

Faktor Beban Dinamis (FBD) digunakan untuk memastikan adanya interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan struktur jembatan. Besarnya nilai BGT pada pembebanan lajur "D" dan beban roda pada pembebanan truk "T" harus dikalikan dengan FBD agar pengaruh dinamis kendaraan terhadap jembatan dapat diperhitungkan dengan tepat. Berdasarkan pada Pasal 8.6 *SNI-1726-2016*, FBD merupakan nilai tambahan yang dinyatakan sebagai fraksi dari beban statis dan diterapkan pada kondisi batas daya layan maupun batas ultimit. Sementara itu, beban terbagi rata (BTR) pada lajur "D" tidak dikenakan faktor ini. FBD dapat dilihat pada *SNI 1725-2016* Gambar 28. Pada pembebanan truk "T", nilai FBD ditetapkan sebesar 30% dan diterapkan pada seluruh komponen bangunan yang berada di atas permukaan tanah.



Gambar 3. Ilustrasi skema beban TT (Gambar 26 Standar Nasional Indonesia 1725:2016)

d) Gaya Rem (TB)

Besar gaya rem ditentukan dari nilai maksimum antara dua kondisi, yaitu dua puluh lima persen dari bobot gandar truk rencana atau lima persen dari total bobot truk rencana ditambah beban terbagi rata (BTR). Gaya rem ditentukan beraksi secara horizontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan, mengikuti arah gaya yang dinilai paling membebani struktur. Untuk memperoleh hasil perhitungan gaya rem yang tepat, diperlukan nilai faktor kepadatan lajur, yang dapat ditemukan pada Pasal 8.4.3 *SNI-1725:2016*.

e) Beban Pejalan Kaki (TP)

Trotoar dengan lebar lebih dari 600 mm harus dirancang mampu menahan beban pejalan kaki sebesar 5 kPa dan dianggap bekerja bersamaan dengan beban kendaraan pada tiap lajur.

f) Beban Temperatur

Menurut Pasal 9.3.1 SNI-1726:2016, deformasi yang disebabkan oleh perubahan temperatur merata dapat dihitung dengan mengikuti langkah-langkah yang dijabarkan dalam pasal tersebut. Prosedur ini berlaku baik untuk desain jembatan dengan gelagar dari beton maupun baja. Adapun rentang suhu referensi diambil dari Tabel 18 dalam SNI-1725:2016, dengan nilai minimum dan maksimum ialah $T_{min\,design}$ dan $T_{max\,design}$. Karakteristik material terhadap pengaruh temperatur dapat ditemukan pada Tabel 19 SNI-1725:2016

g) Beban Angin

Salah satu beban yang harus diperhitungkan adalah beban angin. Besarnya tekanan horizontal angin ditentukan melalui prosedur perhitungan beban angin yang telah ditetapkan dalam standar (Pasal 9.6.1 SNI-1725:2016) seperti yang disajikan pada **Persamaan 5** dan **Persamaan 6**.

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \quad \text{Pers. 5)}$$

$$V_{DZ} = 2,5 V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad \text{Pers. 6)}$$

keterangan P_D adalah tekanan desain angin yang dinyatakan dalam MPa, sedangkan P_B merupakan tekanan dasar angin. Parameter V_{DZ} menunjukkan kecepatan rencan angin pada ketinggian tertentu, sementara kecepatan rencana angin (V_B) pada ketinggian 1 m. Kecepatan angin V_{10} didapatkan pada ketinggian 10 m dari permukaan tanah dan dapat diasumsikan sama dengan V_B . Selain itu, V_0 merepresentasikan kecepatan gesekan angin, dalam rumusan 6 panjang gesekan pada area hulu jembatan disebut sebagai Z_0 , dan Z merupakan ketinggian struktur dari permukaan tanah. Seluruh parameter ini digunakan untuk menentukan besarnya tekanan angin horizontal yang bekerja pada jembatan.

Selain tekanan angin horizontal, perlu diperhitungkan juga tekanan angin pada kendaraan. Mengacu pada SNI 1725-2016 Pasal 9.6.1.2, beban angin pada kendaraan bernilai 1,46 N/mm dan bekerja pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Komponen beban angin yang bekerja pada kendaraan merujuk pada Tabel 31 dalam SNI-1725:2016.

h) Beban Gempa

Perencanaan jembatan dilakukan dengan asumsi probabilitas terlampauinya gempa sebesar 7% dalam periode 75 tahun, dengan perhitungan gaya gempa mengacu pada SNI 03-2833-2016 sesuai persamaan **Persamaan 7**.

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R_d} \cdot W_t \quad \text{Pers. 7)}$$

Keterangan rumusan 7 adalah E_Q merupakan gaya gempa horizontal statis (kN), C_{sm} adalah koefisien respons gempa elastis, R_d menunjukkan faktor modifikasi respons, sedangkan W_t merupakan total berat struktur yang mencakup beban mati dan beban hidup yang relevan (kN).

Perencanaan jembatan harus memastikan risiko keruntuhan yang sangat kecil meskipun memungkinkan terjadinya kerusakan signifikan serta gangguan fungsi layanan akibat gempa. Dalam kondisi tertentu, penggantian sebagian atau seluruh struktur mungkin diperlukan. Otoritas terkait juga dapat menetapkan tingkat kinerja yang lebih tinggi, seperti kinerja operasional.

Perencanaan Struktur Atas Jembatan

Perencanaan struktur atas jembatan meliputi perencanaan lantai kendaraan, desain rusuk (Ribs), perencanaan kerb, perencanaan balok melintang dan memanjang, perencanaan damper jembatan, analisis struktur, dan perencanaan profil elemen struktur, pengecekan stabilitas struktur, dan perencanaan sambungan.

a) Pelat Lantai Kendaraan

Ketebalan pelat lantai mengacu pada formula yang tercantum pada **Persamaan 8**.

$$t_p = 0,0065 a \sqrt[3]{P} \quad \text{Pers. 8)}$$

Dalam persamaan tersebut, t_p menunjukkan ketebalan minimum pelat dalam satuan inci, a menggambarkan dimensi interval antar rusuk, dan P merepresentasikan beban dari gandar roda kendaraan (dalam satuan psi), yang telah dikalikan dengan faktor beban dinamis sebesar 30%. Sesuai dengan SNI 1725-2016 Pasal 8.6 faktor beban dinamis dapat dihitung.

b) Perencanaan Rusuk Jembatan

nilai panjang/ jarak dari rusuk dapat dihitung melalui **Persamaan 9**.

$$I_1 = 0,7 l$$

Pers. 9)

Dimana l adalah jarak antara gelagar melintang. Selain it gelagar melintang perlu dikontrol terhadap kelangsingan rusuk mengikuti ketentuan AASHTO 1.7.144. Kontrol kelangsingan dikalkulasikan menggunakan **Persamaan 10**.

$$\left(\frac{L}{r}\right) = 1000 \sqrt{\frac{1500}{f_y} - \frac{2700F}{f_y^2}}$$

Pers. 10)

Dimana keterangan rumusan diatas adalah L merupakan jarak antar balok melintang, r ialah nilai jari-jari girasi dari profil elemen yang mempertimbangkan lebar efektif pelat jembatan, sedangkan f_y ialah *yield stress* elemen ribs/rusuk.

c) Perencanaan Kerb

Beban hidup pada kerb dihitung berdasarkan SNI 1725:2016, bekerja secara horizontal di sepanjang bagian atas kerb jembatan.

d) Perencanaan Balok Struktur Memanjang dan Melintang

Desain balok struktur memanjang dan melintang dilakukan sesuai SNI 1725:2016 dengan mempertimbangkan beban lantai, kerb, sandaran, serta beban hidup jembatan.

e) Perencanaan Damper jembatan

Perencanaan penggunaan damper pada jembatan mengacu pada *SNI 2833:2016* Pasal 6.3.2.2, dengan memperhitungkan kekakuan pegas yang ditentukan dari perpindahan maksimum akibat beban gempa. Pemasangan damper pada arah longitudinal jembatan juga berfungsi mengurangi beban rem. Pemodelan damper dilakukan menggunakan program SAP2000 dan mengikuti *General Guidelines for FVDs dari Taylor Device Inc*.

f) Analisa Struktur dan Penentuan Dimensi

Pemodelan jembatan dengan damper dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000, sekaligus merencanakan dimensi profil struktur utama jembatan busur.

g) Pemeriksaan stabilitas struktur

Analisis kapasitas dan stabilitas struktur baja jembatan ini dilakukan berdasarkan ketentuan *SNI 1729:2015* dan *SNI 1725:2016* dengan tahapan sebagai berikut. (1) Kapasitas tarik diperiksa pada elemen struktur yang menerima beban aksial berupa gaya tarik untuk memastikan kekuatan dan keamanan, sesuai *SNI 1729:2015* Bab D. (2) Kapasitas tekan dianalisis pada batang yang mengalami pemendekan akibat beban aksial tekan dengan mempertimbangkan potensi tekuk, mengacu pada *SNI 1729:2015* Bab E. (3) Evaluasi terhadap kapasitas lentur dilakukan pada elemen struktur dikenai beban momen lentur di sumbu utama, menggunakan pendekatan analisis linear sebagaimana tercantum dalam Bab F *SNI-1729:2015*. (4) Kapasitas geser dihitung untuk memastikan elemen mampu menahan gaya lintang atau geser tanpa mengalami kegagalan, mengacu pada *SNI 1729:2015* Bab G. (5) Pengecekan tekuk lokal dilakukan untuk menganalisis kemungkinan ketidakstabilan pelat badan atau sayap profil sebelum mencapai tegangan leleh. (6) Pengecekan tekuk lateral diterapkan pada balok yang mengalami momen lentur untuk menghindari perpindahan lateral mendadak yang dapat menyebabkan kegagalan, sesuai *SNI 1729:2015* Bab F3. (7) Pembatasan lendutan ditetapkan untuk mengontrol deformasi balok akibat beban layan, yang mencakup beban hidup dan beban kejut, sesuai *SNI 1725:2016* Pasal 8.4.6.1 guna menjaga kinerja struktur jembatan secara keseluruhan.

h) Perencanaan Sambungan

Perencanaan sambungan pada struktur dibedakan menjadi dua jenis, yaitu sambungan baut dan sambungan las. Desain sambungan baut mengacu pada *SNI 03-1729-2015* (LRFD). Perhitungan kekuatan geser dan tarik sambungan menggunakan persamaan desain (ϕR_n) sebagaimana tercantum pada Pasal J3.6 (*SNI 1729:2015* J3-1). Sementara itu, untuk sambungan tipe tumpuan yang menerima kombinasi gaya tarik dan geser, perhitungannya mengikuti ketentuan pada Pasal J3.7. Desain sambungan las mengacu pada *SNI-1729:2015*, di mana kekuatan desain (ϕR_n) untuk sambungan las tumpul ditentukan berdasarkan Tabel J2.5, sedangkan untuk sambungan las sudut, perhitungannya mengikuti ketentuan Pasal J2.4.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Preliminary Design

Dalam perancangan jembatan diperlukan data *existing* dan lingkungan jembatan. Berikut adalah data umum serta parameter lingkungan Jembatan Sembayat Baru II:

Kondisi eksisting jembatan :

- | | |
|---|--------------------|
| a) Nama jembatan | = Sembayat Baru II |
| b) Lokasi | = Kabupaten Gresik |
| c) Panjang jembatan eksisting | = 354 meter |
| d) Lebar jembatan eksisting | = 13 meter |
| e) Tinggi jembatan eksisting | = 6 meter |
| f) Kategori lokasi | = Sub Urban |
| g) Kecepatan angin rencana (V_{DZ}) | = 78,8 km/jam |
| h) Data gempa | |
| a) Jenis tanah | = Tanah Lunak (SE) |
| b) S_s | = 0.6 g |
| c) S_1 | = 0.25 g |
| d) P_g | = 0.3 g |

Setelah didapatkan data umum dan lingkungan jembatan, *preliminary* atau perencanaan awal jembatan dapat dilakukan, berikut adalah data *preliminary* jembatan:

- | | |
|----------------------------------|---|
| a) Panjang jembatan busur | = 354 meter |
| b) Tinggi fokus busur jembatan | = $0.18 L = 52 \text{ m}$ |
| c) Tinggi tampang busur | = $\frac{1}{40} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{25} = 6.5 \text{ m}$ |
| d) Lebar jembatan | = $\frac{b}{L} \leq \frac{1}{20} = 13 \text{ m}$ |
| e) Mutu baja & pelat orthotropic | = Bj 55 |
| f) Mutu beton | = 30 MPa |

Setelah itu penentuan dimensi awal elemen-elemen pada jembatan dapat dilakukan, kemudian dilakukan analisis kapasitas elemen dengan metode trial & error. Adapun elemen struktur terbagi menjadi 2 kategori yaitu rangka primer dan rangka sekunder. Berikut adalah profil awal yang digunakan:

Rangka Primer :

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| a) Batang busur atas | = BOX 800.600.30.20 |
| b) Batang busur bawah | = BOX 800.600.20.20 |
| c) Rangka tegak | = WF 600.400.12.19 |
| d) Rangka miring | = WF 600.400.12.19 |
| e) Batang tarik | = BOX 1400.800.50.50 |
| f) Batang busur bawah (tumpuan) | = BOX 1500.800.65.65 |

Rangka Sekunder :

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| a) Gelagar Melintang | = WF 650.350.20.30 |
| b) Ikatan angin diagonal | = WF 300.300.10.15 |
| c) Ikatan angin vertikal | = WF 175.175.7,5.11 |
| d) Rusuk pelat | = T 400.150.12.22 |

Elemen Struktur Sekunder

Struktur sekunder terdiri dari gelagar melintang, ikatan angin, dan pelat lantai kendaraan. Hal yang perlu dicermati adalah analisis struktur sekunder tidak dapat dianalisis bersama keseluruhan struktur, dan dianalisis struktur sekunder dilakukan secara terpisah.

a) Pelat Kendaraan

Analisis pelat kendaraan dengan beban rencana 112,5 kN, tebal minimum pelat yang dibutuhkan sebesar 12,57 mm sehingga digunakan tebal rencana 15 mm untuk kemudahan pelaksanaan. Dengan rencana lapisan perkerasan berupa aspal setebal 50 mm dengan trotoar setinggi 250 mm. Hasil evaluasi menunjukkan tegangan pelat yang terjadi sebesar 1685,28 kg/cm² tidak melebihi tegangan izin 2100 kg/cm², dan lendutan maksimum 0,0303 in masih berada di bawah lendutan izin 0,0525 in, sehingga desain pelat dinyatakan aman. Adapun secara garis besar analisis perencanaan pelat kendaraan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil analisis pelat kendaraan

Parameter	Nilai Hasil	Keterangan
Beban rencana (P)	112,5 kN	Beban kendaraan
Tebal minimum pelat	12,57 mm	Hasil perhitungan
Tebal pelat rencana	15 mm	Digunakan
Tebal lapis aspal	50 mm	-
Tinggi trotoar	250 mm	-
Tegangan izin (σ_{ijin})	2100 kg/cm ²	Kapasitas bahan
Tegangan pelat (σ)	1685,28 kg/cm ²	Aman ($< \sigma_{ijin}$)
Lendutan maksimum	0,0303 in	Aman ($< 0,0525$ in)

b) Perencanaan Rusuk

Perencanaan rusuk menggunakan profil T 175.35.19.12 dengan beban maksimum menghasilkan momen sebesar 26.054 kg.m dan gaya geser 25.450 kg. Hasil analisis menunjukkan kapasitas momen dan geser profil lebih besar dari gaya dalam yang terjadi, dengan lendutan maksimum 2,5 mm yang masih lebih kecil dari batas izin 6,25 mm. Rasio kelangsingan juga berada di bawah nilai batas sehingga stabilitas terpenuhi. Sambungan rusuk terhadap gelagar melintang direncanakan dengan menggunakan sambungan las setebal 5 mm berdasarkan perhitungan kapasitas sambungan dan mutu las E80xx. Dengan demikian, elemen rusuk dinyatakan aman terhadap kekuatan, kekakuan, serta sambungan. Secara garis besar analisis perhitungan perencanaan rusuk jembatan dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil analisis perencanaan rusuk jembatan

Parameter	Nilai Hasil	Keterangan
Momen maksimum (M_u)	26.054 kg.m	Beban ultimate
Gaya geser maksimum (V_u)	25.450 kg	Beban ultimate
Profil rusuk	T 175.35.19.12	Profil yang digunakan
Kapasitas momen (ϕM_n)	4.780.658 kg.cm	$\geq M_u \rightarrow$ Aman
Kapasitas geser (ϕV_n)	83.689,2 kg	$\geq V_u \rightarrow$ Aman
Lendutan (W)	2,5 mm	$\leq 6,25$ mm \rightarrow Aman
Kelangsingan (L/r)	29,463	$< 83,20 \rightarrow$ Aman
Sambungan las - M_u	4.562,54 kg.m	Beban 1 truk
Sambungan las - V_u	11.316 kg	Beban 2 truk
Tebal las rencana	5 mm	Digunakan untuk desain

Perencanaan Gelagar Melintang

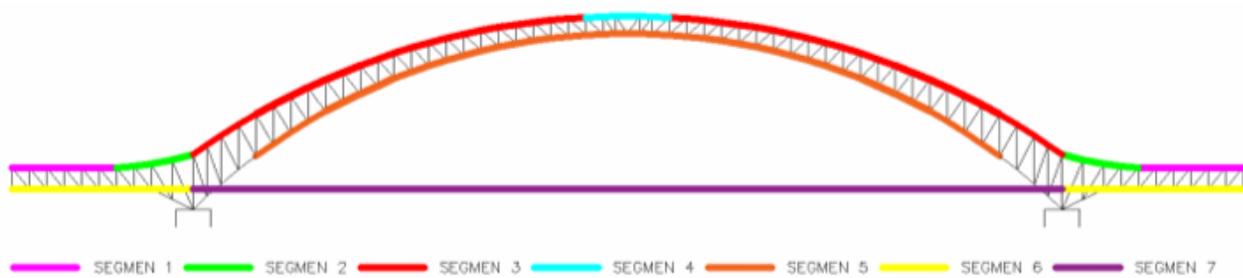
Gelagar melintang direncanakan menggunakan profil girder 650×350×20×30 dengan momen maksimum 265.194,27 kg.m dan gaya geser 176.129,04 kg. Hasil evaluasi kapasitas momen, geser, lendutan, dan kelangsingan menunjukkan bahwa elemen memenuhi seluruh persyaratan kekuatan dan stabilitas. Sambungan las direncanakan menggunakan mutu las E90xx dengan tebal 19 mm, sedangkan sambungan baut menggunakan baut diameter 24 mm mutu A490. Pada sambungan pelat sayap diperlukan 18 baut dan pada sambungan pelat badan diperlukan 12 baut dengan pelat tebal masing-masing 16 mm dan 20 mm mutu BJ 41. Dengan demikian, gelagar melintang dinyatakan aman terhadap kekuatan, kekakuan, serta sambungan. Hasil analisis perencanaan gelagar melintang secara umum terlampir pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Desain analisis perencanaan balok gelagar melintang jembatan

Parameter	Nilai Hasil	Keterangan
Momen maksimum (M_u)	265.194,27 kg.m	Beban rencana
Gaya geser maksimum (V_u)	176.129,04 kg	Beban rencana
Profil girder	650×350×20×30	Digunakan untuk desain
Kapasitas momen (ϕM_n)	304.443,45 kg.m	$\geq M_u \rightarrow$ Aman
Kapasitas geser (ϕV_n)	261.252 kg	$\geq V_u \rightarrow$ Aman
Lendutan (Δ)	12,62 mm	$\leq 16,12$ mm \rightarrow Aman
Kelangsingan (L/r)	29,463	$< 83,20 \rightarrow$ Aman
Sambungan las	Tebal 19 mm (E90xx)	Aman
Sambungan baut – pelat sayap	18 baut Ø24 mm A490	Pelat 16 mm BJ 41
Sambungan baut – pelat badan	12 baut Ø24 mm A490	Pelat 20 mm BJ 41

Perencanaan Ikatan Angin

Profil yang digunakan pada jembatan ini dibagi menjadi tujuh segmen berikut skema penggunaan profil ikatan angin pada jembatan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

**Gambar 4.** Konfigurasi Profil Ikatan Angin Jembatan

Perencanaan ikatan angin pada jembatan dibagi menjadi tujuh segmen sesuai konfigurasi struktur. Profil ikatan angin yang dipilih adalah WF dengan mutu baja BJ 55. Gaya aksial tarik maksimum pada ikatan angin adalah sebesar 511.407 kg dan gaya tekan maksimum sebesar 517.024,75 kg. Hasil kontrol kapasitas menunjukkan bahwa profil WF 300.300.10.15 memiliki kapasitas tarik dan tekan yang lebih besar dibandingkan gaya rencana, sehingga profil dinyatakan kuat. Untuk setiap segmen ikatan angin, desain profil baja dan jumlah sambungan baut ditentukan berdasarkan besarnya gaya aksial yang bekerja, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil desain profil ikatan angin jembatan

No.	Structural Segment	Axial Compressive Force (kg)	Axial Tensile Force (kg)	Design of Steel Profile	Number of Bolted Connections
1	I	139 602,61	139 596,73	WF 150.150.7.10	8
2	II	68 345,33	68 339,43	WF 100.100.6.8	8
3	III	517 024,75	511 407,00	WF 300.300.10.15	24
4	IV	159 654,80	159 587,02	WF 175.175.7.5.11	8
5	V	173 985,48	173 935,09	WF 175.175.7.5.11	10
6	VI	145 240,57	145 240,64	WF 150.150.7.10	8
7	VII	33 246,41	33 241,01	WF 100.50.5.7	8

Kombinasi Pembebanan

Mengacu pada SNI 1725 2016 pasal 6.1, kombinasi pembebanan yang digunakan dalam analisis jembatan busur rangka baja ditentukan sebagai berikut:

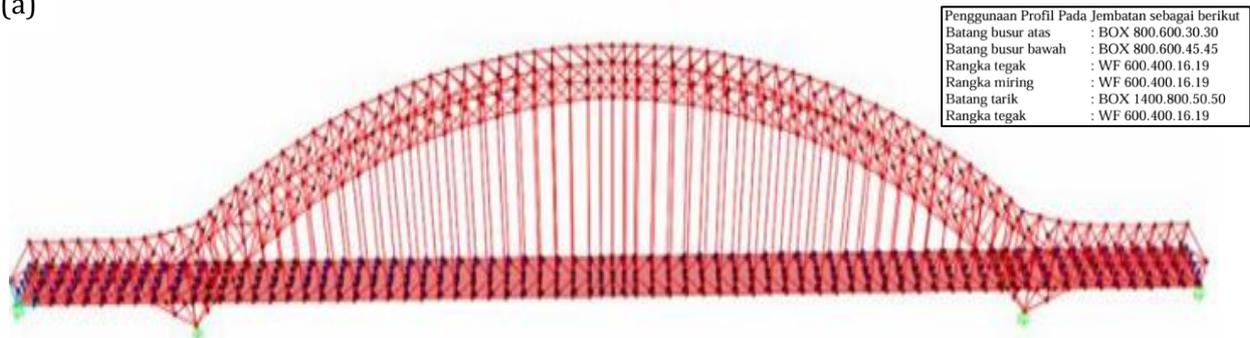
- Strength 1 : 1,1 MS + 2 MA + 1,8 LL + 1 EUn
- Strength 2 : 1,1 MS + 2 MA + 1,4 LL + 1 EUn
- Strength 3 : 1,1 MS + 2 MA + 1,4 EWs + 1 EUn
- Strength 4 : 1,1 MS + 2 MA + 1 EUn
- Strength 5 : 1,1 MS + 2 MA + 0,4 EWs + 1 EUn
- Ekstrem 1 : 1,1 MS + 2 MA + 0,5 LL + 0,3 Eqx + 1 Eqy
- Ekstrem 2 : 1,1 MS + 2 MA + 0,5 LL + 1 Eqx + 0,3 Eqy

- h) Serviceability 1 : 1 MS + 1 MA + 1 LL + 1 EWs + 1 EUn
 i) Serviceability 2 : 1 MS + 1 MA + 1,3 LL + 1 EUn
 j) Serviceability 3 : 1 MS + 1 MA + 0,8 LL + 1 EUn
 k) Serviceability 4 : 1 MS + 1 MA + 0,7 EWs + 1 EUn
 l) Fatigue : 0,75 LL

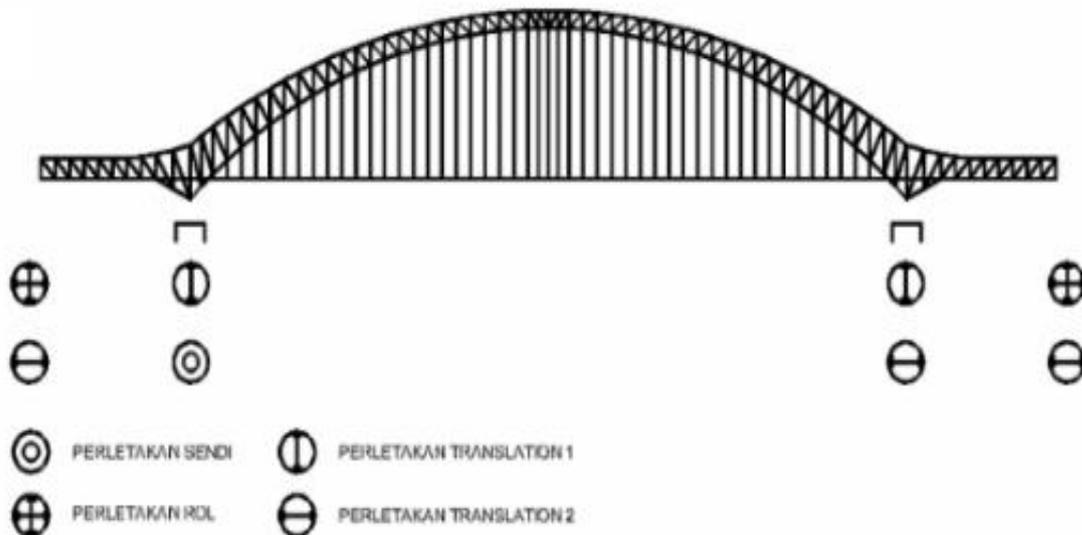
Pemodelan Struktur Utama Jembatan

Jembatan dimodelkan dengan *software* analisis struktur yaitu SAP2000. Adapun permodelan jembatan sebagaimana pada **Gambar 5(a)**. Perletakkan yang digunakan pada lantai kendaraan adalah sendi dan rol. Sistem perletakkan dirancang agar mampu menahan gaya horizontal maupun vertikal yang timbul akibat beban kerja pada struktur jembatan Desain perletakkan jembatan sesuai dengan **Gambar 5(b)**.

(a)



(b)



Gambar 5. (a) Permodelan jembatan busur rangka baja menggunakan SAP2000 dan penggunaan profil pada jembatan dan **(b)** Desain perletakkan jembatan

Perencanaan Tie Beam, Batang Busur, dan Batang Rangka Struktur

Perencanaan elemen struktur jembatan meliputi tie beam, batang busur, dan batang rangka struktur menggunakan profil baja kotak (BOX) dan profil WF. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi beban ultimate, seluruh elemen memiliki kapasitas tarik, tekan, geser, momen, dan torsi yang lebih besar daripada beban rencana. Tie beam dengan profil BOX 1400.800.50.50 mampu menahan gaya tarik hingga 7.749.000 kg dan gaya tekan 815.220 kg. Batang busur menggunakan profil BOX 1500.800.65.65 memiliki kapasitas tarik 10.649.340 kg serta kapasitas momen dan torsi yang besar, sehingga aman terhadap beban ultimit. Batang rangka struktur dengan profil WF 700.600.26.22 juga dinyatakan aman karena kapasitas aksial dan geser lebih tinggi daripada beban rencana. Secara keseluruhan, hasil

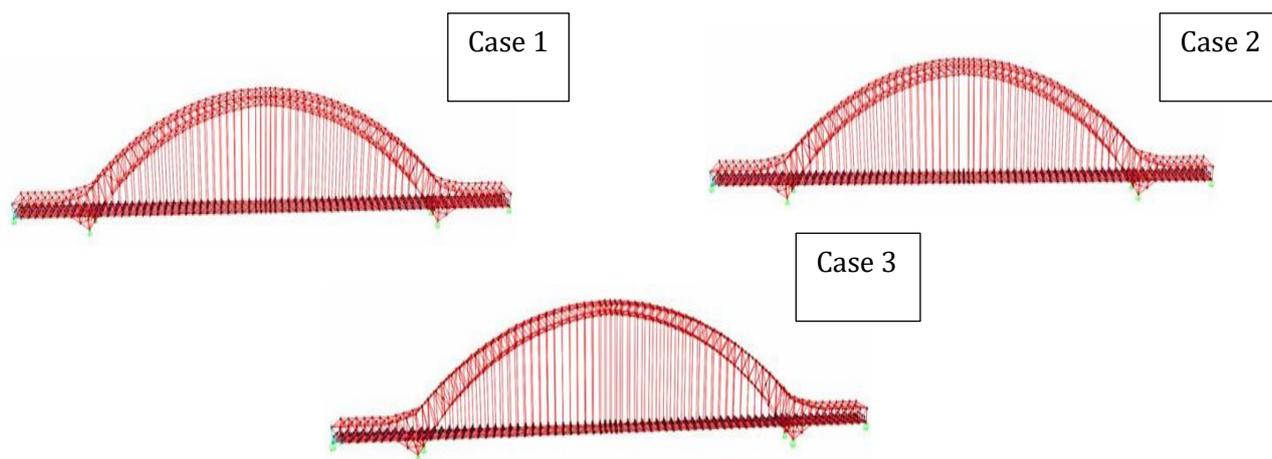
perencanaan memperlihatkan bahwa semua elemen utama jembatan memenuhi persyaratan kekuatan dan stabilitas. Hasil perencanaan elemen struktur jembatan tie beam, batang busur, dan batang rangka struktur disajikan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Hasil desain dan kontrol kapasitas tie beam, batang busur, dan batang rangka struktur

Perencanaan		Tie Beam	Batang Busur	Batang Rangka Struktur	
	Profil Penampang	BOX 1400.800.50.50	BOX 1500.800.65.65	WF 700.600.26.22	
Aksial	Tarik (Kg)	Beban Ultimate	6594917	8546315	1629448
		Kapasitas	7749000	10649340	1675260
		Cek	OK	OK	OK
	Tekan (Kg)	Beban Ultimate	815220	8546315	42359
		Kapasitas	5274739	10553934	1486732
		Cek	OK	OK	OK
Geser	Sumbu X (Kg)	Beban Ultimate	49325	911652	-
		Kapasitas	1476000	1642972 5	-
		Cek	OK	OK	-
	Sumbu Y (Kg)	Beban Ultimate	49325	363691	-
		Kapasitas	1199250	1918800	-
		Cek	OK	OK	-
Momen	Sumbu X (Kg.cm)	Beban Ultimate	15870825	463972100	-
		Kapasitas	355162500	517644270	-
		Cek	OK	OK	-
	Sumbu Y (Kg.cm)	Beban Ultimate	6800021	193950300	-
		Kapasitas	238927500	344590650	-
		Cek	OK	OK	-
Torsi (Kg.cm)	Beban Ultimate	28548589	43508900	-	
	Kapasitas	206493461	273721069 3	-	
	Cek	OK	OK	-	

Perencanaan Penggantung Jembatan

Evaluasi gaya tarik kabel mencakup simulasi kondisi ekstrem, khususnya skenario kegagalan sebagian elemen sistem. Analisis dilakukan terhadap tiga kondisi representatif, yakni: Case pertama mencerminkan keadaan ideal di mana seluruh kabel berfungsi normal; Case kedua merepresentasikan kegagalan pada kabel tengah; dan Case ketiga mengasumsikan kegagalan terjadi pada kabel ujung dengan panjang maksimum. Masing-masing skenario dianalisis untuk menilai distribusi gaya dan kinerja sistem secara menyeluruh. Ketiga kondisi ini ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Simulasi terburuk pada perhitungan kabel jembatan

Perencanaan kabel penggantung jembatan mempertimbangkan kondisi ekstrem dengan tiga skenario simulasi, yaitu kondisi normal, kegagalan kabel tengah, dan kegagalan kabel ujung dengan panjang maksimum. Hasil analisis menunjukkan gaya tarik yang terjadi pada kabel tetap dalam batas aman. Kabel penggantung yang digunakan berdiameter 97 mm dengan berat jenis 46,7 kg/m, memiliki kapasitas sebesar 463,9 ton lebih besar dibanding beban tarik total sebesar 279,46 ton, sehingga dinyatakan aman terhadap beban rencana. Sambungan pada tie beam menggunakan baut mutu A490

dengan pelat sambung mutu BJ 41, serta pelat simpul setebal 36 mm untuk menjamin kekuatan sistem sambungan. Hasil perencanaan kabel penggantung secara umum dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Hasil analisis penggantung jembatan

Parameter	Nilai Hasil	Keterangan
Diameter kabel (\emptyset)	97 mm	Kabel utama
Berat jenis kabel	46,7 kg/m	
Beban tarik total (Vtotal)	279,46 ton	< kapasitas 463,9 ton → OK
Minimum break load	463,9 ton	Kapasitas kabel
Baut sambungan tie beam	$\emptyset 24$ mm A490 ($F_{nv} = 579$ MPa)	24 baut
Luas baut (Ab)	572,55 mm ²	
Baut tambahan	$\emptyset 36$ mm A490 (24 buah)	
Tebal pelat simpul	36 mm	
Diameter kabel (\emptyset)	97 mm	Kabel utama
Berat jenis kabel	46,7 kg/m	

Perencanaan Portal Akhir

Hasil desain dan evaluasi kapasitas elemen struktur portal akhir terbagi menjadi daerah portal akhir dan tengah yang dapat dilihat pada Tabel 8, baik pada batang vertikal maupun horizontal. Pada elemen batang vertikal portal akhir digunakan profil penampang kotak (BOX 800.600.30.30). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas tarik sebesar 2.966.760 kg lebih besar terhadap beban ultimate 680.556 kg, sehingga dinyatakan aman. Demikian pula pada kondisi tekan, kapasitas 2.811.772 kg mampu menahan beban ultimate 680.556 kg. Evaluasi terhadap gaya geser pada sumbu X dan Y serta momen lentur juga memperlihatkan bahwa seluruh nilai kapasitas elemen melampaui beban ultimate yang bekerja. Pada batang horizontal portal akhir dengan profil WF 600.400.12.19, beban aksial relatif kecil dibandingkan kapasitasnya, baik untuk kondisi tarik maupun tekan. Kapasitas tekan 186.905 kg, misalnya, masih mampu menahan beban ultimate sebesar 12.252 kg. Hasil analisis kapasitas geser dan momen, yang menunjukkan bahwa kapasitas elemen melebihi beban rencana sehingga struktur dinyatakan aman. Sementara itu, portal akhir tengah menggunakan batang vertikal dengan penampang kotak (BOX 1400.800.50.50). Hasil analisis menunjukkan kapasitas tarik 7.749.000 kg dan kapasitas tekan 7.526.651,13 kg, keduanya secara signifikan lebih tinggi daripada beban ultimate masing-masing 1.618.944 kg. Kondisi serupa terlihat pada kapasitas geser dan momen, di mana kapasitas elemen lebih besar dari beban ultimate yang bekerja. Batang horizontal portal akhir tengah menggunakan profil WF yang sama dengan portal akhir. Seluruh elemen berada dalam kondisi aman dimana kapasitas lebih besar dari beban ultimate. Hasil perencanaan portal akhir dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Hasil desain dan kontrol kapasitas elemen struktur portal akhir

Perencanaan		Portal Akhir		Portal Akhir Tengah		
		Batang Vertikal	Batang Horizontal	Batang Vertikal	Batang Horizontal	
Profil Penampang		BOX 800.600.30.30	WF 600.400.12.19	BOX 1400.800.50.50	WF 600.400.12.19	
Tarik (Kg)	Beban Ultimate	680556	-	1618941	-	
	Kapasitas	2966760	-	7749000	-	
	Cek	OK	-	OK	-	
Tekan (Kg)	Beban Ultimate	680556	12252	1618941	92321	
	Kapasitas	2811772	186905	75266651 13	186905	
	Cek	OK	OK	OK	OK	
Geser	Arah Sumbu X (Kg)	Beban Ultimate	297	20810	27090 35	2361
	Kapasitas	819180	255052 8	2398500	255052 8	
	Cek	OK	OK	OK	OK	
	Arah Sumbu Y (Kg)	Beban Ultimate	136992	23184	823761 47	2361
	Kapasitas	409590	201916 8	1199250	201916 8	
	Cek	OK	OK	OK	OK	
Momen (Kg.cm)	Beban Ultimate	80561916	16474280	47264740	16474280	
	Kapasitas	81453060	19789470	355162500	19789470	
	Cek	OK	OK	OK	OK	

Sambungan pada Rangka Utama

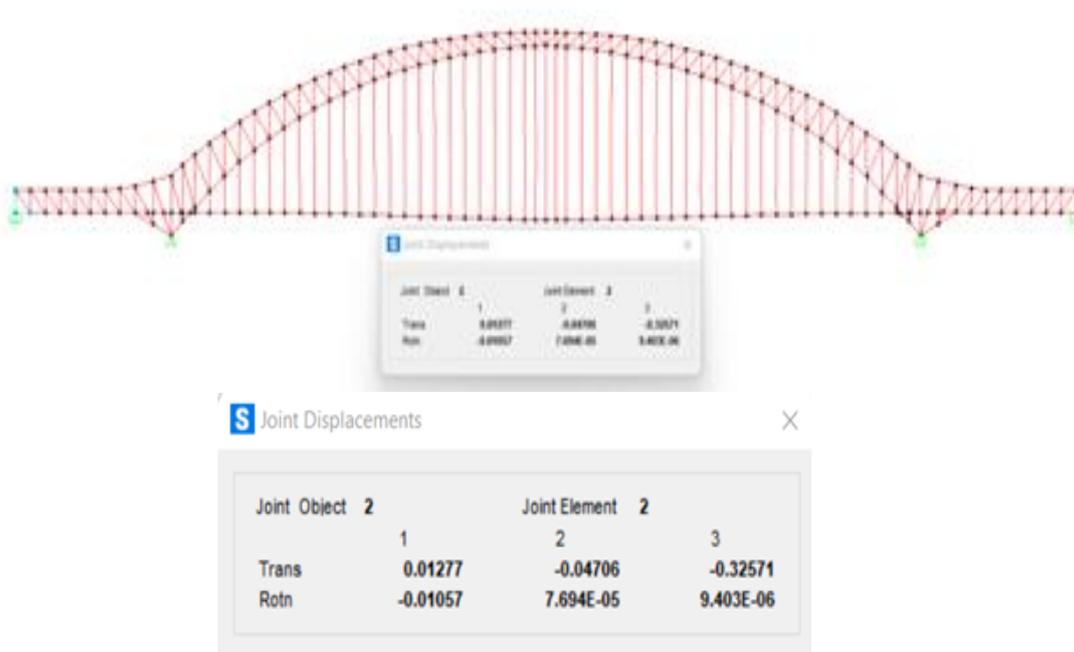
Pada Tabel 9, hasil desain analisis sambungan baut pada rangka utama jembatan terlampir. Pada elemen frame, digunakan baut Ø27 mm mutu A490 ($T_b = 334$ N) dengan jumlah bervariasi, yaitu 32 buah untuk profil WF 600.600.26.22 dan 112 buah untuk BOX 1400.800.30.30. Pada elemen suspender cable, digunakan baut Ø24 mm mutu A490 ($T_b = 257$ N) dengan total 24 buah, sedangkan tie beam menggunakan baut Ø36 mm mutu A490 ($T_b = 595$ N) dengan jumlah 198 buah. Variasi diameter, mutu, dan jumlah baut ini memastikan setiap sambungan mampu menahan beban sesuai fungsinya, sehingga sistem sambungan dinyatakan aman dan tidak menjadi titik lemah struktur jembatan. Hasil desain perencanaan sambungan baur rangka utama jembatan dapat dilihat pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Sambungan baut rangka utama jembatan

Elemen Jembatan	Sambungan Baut	Jumlah Baut
Frame	Diameter : 27 mm	Frame 178 = WF 600.600.26.22 → 32 D27
	Luas Baut : 1017,88 mm ²	Frame 192 = WF 600.600.26.22 → 32 D27
	Mutu Baut : A490 ($T_b = 334$ N)	Frame 294 = BOX 1400.800.30.30 → 112 D27
		Frame 293 = BOX 1400.800.30.30 → 112 D27
Suspender Cable	Diameter : 24 mm Luas Baut : 452,38 mm ² Mutu Baut : A490 ($T_b = 257$ N)	Number of Bolts = 24 D27
Tie Beam	Diameter : 36 mm Luas Baut : 572,55 mm ² Mutu Baut : A490 ($T_b = 595$ N)	Number of Bolts = 198 D27

Pengecekan Lentutan

Dalam perencanaan struktur jembatan, aspek lentutan menjadi salah satu kriteria utama yang harus dikendalikan. Besarnya lentutan aktual pada struktur tidak diperbolehkan melampaui batas lentutan ijin yang ditentukan oleh standar. Mengacu pada SNI 1725:2016, batas lentutan ijin pada jembatan umumnya diatur sebesar $L/1000$, dengan L adalah panjang bentang struktur. Lentutan jembatan dapat diperoleh dari output SAP 2000, besar lentutan jembatan dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Defleksi jembatan SAP 2000

$$\Delta_{Lajur D} = 325 \text{ mm} < \Delta_{Ijin} = 354 \text{ mm} \dots \text{OK!}$$

Perencanaan Damper Jembatan

Damper FVD dimodelkan sebagai link di SAP2000 untuk menganalisis pengaruhnya terhadap perpindahan struktur. Efektivitas diuji dengan membandingkan model tanpa dan dengan damper. Permodelan FVD pada SAP 2000 sesuai dengan **Gambar 8** dan **Tabel 10**.



Gambar 8. Permodelan FVD pada perletakkan jembatan

Tabel 10. Pengaruh penggunaan damper pada perpindahan dasar jembatan

No	Point Perletakkan	Perpindahan Tanpa Damper	Perpindahan dengan Damper	Presentase Penurunan (%)
1	85	17,61	9,72	45
2	185	30,25	29,34	3
3	1096	17,08	9,48	45
4	996	37,97	34,74	9
Rata-rata Reduksi Defleksi				25

Hasil analisis pada Gambar 8 dan Tabel 10 menunjukkan bahwa penerapan damper FVD mampu mereduksi perpindahan struktur jembatan dengan rata-rata penurunan sebesar 25%. Reduksi maksimum terjadi pada titik perletakan 85 dan 1096 dengan nilai 45%, sedangkan titik 185 hanya mengalami penurunan 3%. Variasi ini mengindikasikan bahwa efektivitas damper sangat bergantung pada posisi pemasangan dan respons dinamis lokal struktur. Secara keseluruhan, penggunaan damper terbukti meningkatkan kinerja jembatan dalam menekan deformasi berlebih, sehingga dapat direkomendasikan sebagai elemen peredam energi tambahan pada perencanaan jembatan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian analisis yang telah dilakukan secara sistematis terhadap modifikasi perencanaan struktur Jembatan Sembayat Baru II, yang mengintegrasikan penggunaan pelat orthotropik sebagai lantai kendaraan serta penambahan perangkat peredam berupa FVD maka dapat disusun kesimpulan sebagai berikut:

- a) Jembatan yang dirancang memiliki konfigurasi geometrik dengan panjang bentang total mencapai 354 meter dan lebar keseluruhan 13 meter. Lebar efektif jalur lalu lintas ditetapkan sebesar 11 meter yang dapat mengakomodasi empat lajur kendaraan, serta dilengkapi dengan fasilitas trotoar selebar 1 meter pada masing-masing sisi jembatan untuk kebutuhan pejalan kaki.
- b) Dari hasil perhitungan teknis elemen-elemen struktural utama jembatan busur, diperoleh beberapa spesifikasi teknis sebagai berikut:
 1. Pelat lantai kendaraan didesain menggunakan sistem pelat orthotropik berbahan baja mutu tinggi BJ55, dengan tulangan berupa profil T 400.150.12.22, serta ketebalan pelat lantai ditentukan sebesar 15 mm untuk menjamin kekakuan dan kekuatan pelat terhadap beban lalu lintas.
 2. Gelagar melintang dirancang menggunakan profil GIRDER 650.350.30.40 dari baja BJ55 untuk mendistribusikan beban secara merata ke sistem struktur utama.
 3. Sistem ikatan angin menggunakan material baja BJ55 dengan penampang profil yang dirujuk berdasarkan standar pada Tabel 4.8, guna menjamin kestabilan lateral struktur terhadap pengaruh angin.

4. Tie beam atau balok tarik utama dirancang dengan penampang kotak (box girder) berukuran 1400.800.50.50 dari baja BJ55, serta diperkuat oleh pengaku longitudinal dan transversal untuk meningkatkan kekakuan dan kestabilan struktural.
 5. Kabel penggantung yang berfungsi menghubungkan pelat lantai dengan elemen busur menggunakan batang tarik Macalloy M100 berdiameter 97 mm, yang dirancang dengan kapasitas putus minimum mencapai 4551 kN, guna menjamin ketahanan terhadap beban tarik maksimum.
 6. Batang busur sebagai elemen utama penahan beban vertikal dan lateral didesain menggunakan baja BJ55 dengan profil penampang sesuai dengan ketentuan pada Lampiran C dokumen perencanaan.
- c) Proses pemodelan dan analisis perilaku struktur jembatan busur dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak rekayasa struktur SAP2000, yang memungkinkan simulasi respons struktur secara menyeluruh terhadap berbagai kombinasi beban, termasuk pengaruh perangkat peredam.
- d) Hasil analisis pemodelan menunjukkan bahwa penerapan FVD, yang dimodelkan sebagai elemen link atau support dalam arah longitudinal, memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan perpindahan (*displacement*) pada struktur. Efektivitas damper diuji melalui perbandingan antara dua skenario pemodelan, yakni model tanpa damper dan model dengan damper. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa reduksi defleksi maksimum yang dicapai berkisar antara 3% hingga 45% tergantung pada titik pengamatan, dengan nilai rata-rata penurunan sebesar 25%, yang mengindikasikan bahwa penambahan FVD dapat meningkatkan performa dinamik struktur secara efektif.

REFERENSI

- Arslan, A., 2020. Bridges as City Landmarks: A Critical Review on Iconic Structures. *Journal of Design Studio*, pp.85–99. <https://doi.org/10.46474/jds.798072>.
- Chen, W.-F. and Duan, L., 2014. *Bridge Engineering Handbook Super Structure Design*. Civ. Eng. (N.Y.), .
- Khedmatgozar Dolati, S.S., Mehrabi, A. and Khedmatgozar Dolati, S.S., 2021. Application of viscous damper and laminated rubber bearing pads for bridges in seismic regions. *Metals*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/met11111666>.
- Kiral, A., Gurbuz, A. and Ustabas, I., 2025. The Seismic Response Evaluation of an Existing Multi-span Reinforced Concrete Highway Bridge in the Presence of Linear and Nonlinear Viscous Dampers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(11), pp.8317–8335. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09265-2>.
- Mauliana, Y. and Saputra, F., 2024. Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil. [online] 5(2). Available at: <https://jurnal.unsil.ac.id/index.php/akselerasi/article/view/10189/3204>
- Propika, J. and Septiarsilia, Y., 2020. *Re-Design Jembatan THP dengan Sistem Box Girder Segmental*.
- Sun, N., Zheng, X., Li, Y., Zhao, Y., Yuan, H. and Zhou, M., 2024. Numerical Study on the Mechanical Performance of a Flexible Arch Composite Bridge with Steel Truss Beams over Its Entire Lifespan. *Sustainability (Switzerland)*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/su16146041>.
- Sunarjo, T. dan Sugeng, P., 2010. Gempa Bumi Edisi Populer. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Tiwari, H., Rai, S.P. and Shivangi, K., 2016. Bridging the gap or broadening the problem? *Natural Hazards*, 84(1), pp.351–366. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2422-x>.
- Yi, J., Li, J. and Guan, Z., 2018. Shake Table Studies on Viscous Dampers in Seismic Control of a Single-Tower Cable-Stayed Bridge Model under Near-Field Ground Motions. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(5). <https://doi.org/10.1142/S1793431118500112>.
- Zhang, X., Deng, Z., Fang, G. and Ge, Y., 2022. Theoretical Analysis of Ultimate Main Span Length for Arch Bridge. *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142417043>.
- si Nasional (BSN), 2016. SNI 1725:2016 – Beban Minimum untuk Perancangan Jembatan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2015. SNI 1729:2015 – Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- ASCE, 2016. ASCE/SEI 7-16 – Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2019. SNI 2847:2019 – Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Brockenbrough, R. L., 1994. *Highway Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Wai-Fah, C. & Duan, L., 2014. *Bridge Engineering Handbook: Substructure Design*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press.
- Heins, C. P. & Affirmage, E. G., 1990. *Design of Modern Steel Structures*. New York: Wiley.
- Setiawan, A., 2015. *Struktur Baja: Konsep dan Aplikasi untuk Bangunan Gedung*. Yogyakarta: Graha Ilmu.