

Analisis Struktur Atas Jembatan Rangka Baja Tipe Warren Kelas A60 (Studi Kasus: Jembatan Marsedan Kabupaten Kapuas Hulu Kalimantan Barat)

¹Dede Firdaus; ²Reynold Andika Pratama

^{1,2} Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Dian Nusantara

Email Korespondensi: 521211043@mahasiswa.undira.ac.id

Abstrak

Pembangunan infrastruktur transportasi memerlukan perencanaan jembatan yang tidak hanya aman, tetapi juga efisien dan ekonomis guna mendukung kelancaran mobilitas masyarakat serta distribusi barang. Salah satu tipe jembatan yang banyak digunakan adalah jembatan rangka baja tipe Warren kelas A60, yang dipilih karena memiliki keunggulan dalam efisiensi distribusi beban, kekakuan tinggi untuk bentang panjang, serta ketahanan terhadap beban dinamis. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja struktur atas Jembatan Marsedan yang direncanakan di Kabupaten Kapuas Hulu, Kalimantan Barat, dengan fokus pada kapasitas momen lentur, gaya geser, gaya aksial, serta lendutan struktur terhadap kombinasi pembebanan sesuai standar. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan acuan SNI 1725:2016 untuk pembebanan, SNI 2833:2016 untuk beban gempa, serta SNI 1729:2020 untuk perencanaan struktur baja. Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh elemen struktur memiliki kapasitas yang memadai dalam menahan beban rencana. Namun, lendutan yang terjadi melebihi batas izin, sehingga diperlukan penerapan sistem lawan lendut (camber system) untuk menjaga kinerja layanan jembatan. Secara keseluruhan, desain jembatan dinyatakan aman, andal, serta layak direalisasikan sebagai bagian dari pembangunan infrastruktur strategis daerah.

Kata kunci: Jembatan Baja, Warren A60, Analisis Struktur, SAP2000

Superstructure Analysis of a Warren-Type Steel Truss Bridge Class A60 (Case Study: Marsedan Bridge, Kapuas Hulu Regency, West Kalimantan)

Abstract

The development of transportation infrastructure requires bridge planning that is not only safe, but also efficient and economical to support the smooth mobility of people and the distribution of goods. One type of bridge that is widely used is the Warren type A60 steel truss bridge, which is chosen because it has advantages in load distribution efficiency, high stiffness for long spans, and resistance to dynamic loads. This study aims to analyze the performance of the superstructure of the Marsedan Bridge planned in Kapuas Hulu Regency, West Kalimantan, with a focus on the capacity of bending moments, shear forces, axial forces, and deflections of the structure against standard loading combinations. The analysis was carried out using SAP2000 software with reference to SNI 1725:2016 for loading, SNI 2833:2016 for earthquake loads, and SNI 1729:2020 for steel structure planning. The results of the analysis indicate that all structural elements have adequate capacity to withstand the design loads. However, the deflection that occurs exceeds the permitted limit, so the application of a camber system is required to maintain the bridge's service performance. Overall, the bridge design was declared safe, reliable, and worthy of being realized as part of the regional strategic infrastructure development.

Keywords: Steel Bridge, Warren A60, Structural Analysis, SAP2000

How to Cite: Firdaus, D., & Pratama, R. . A. (2025). Analisis Struktur Atas Jembatan Rangka Baja Tipe Warren Kelas A60 (Studi Kasus: Jembatan Marsedan Kabupaten Kapuas Hulu Kalimantan Barat). *Journal of Authentic Research*, 4(Special Issue), 751-763. <https://doi.org/10.36312/jar.v4iSpecial Issue.3339>



<https://doi.org/10.36312/jar.v3i2.2015>

Copyright© 2025, Firdaus & Pratama.

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) License.



PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur transportasi merupakan salah satu aspek fundamental dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan pemerataan pembangunan suatu wilayah. Infrastruktur yang memadai memungkinkan terjadinya mobilitas manusia, barang, dan jasa secara efisien sehingga mendorong aktivitas sosial-ekonomi masyarakat. Di antara berbagai bentuk infrastruktur transportasi, jembatan memiliki peran yang sangat vital. Jembatan berfungsi sebagai penghubung antarwilayah, baik antarkota, antarprovinsi, maupun antarwilayah pedalaman yang dipisahkan oleh kondisi geografis tertentu seperti sungai, lembah, rawa, maupun kawasan perairan lainnya. Tanpa adanya jembatan yang memadai, konektivitas wilayah akan terganggu, yang pada akhirnya menimbulkan keterisolasian, kesenjangan pembangunan, serta hambatan dalam akses pelayanan publik.

Di wilayah pedalaman Kalimantan, termasuk Kabupaten Kapuas Hulu, kebutuhan akan jembatan menjadi semakin mendesak. Kapuas Hulu dikenal memiliki kondisi geografis yang khas, yaitu terbagi oleh banyak sungai besar yang berfungsi sebagai jalur transportasi sekaligus penghalang utama bagi aksesibilitas darat. Sungai Kapuas sebagai sungai terpanjang di Indonesia, beserta anak-anak sungainya, menjadi ciri dominan bentang alam daerah ini. Kondisi tersebut menyebabkan pembangunan jaringan jalan raya tidak dapat berdiri sendiri tanpa keberadaan jembatan sebagai infrastruktur pendukung. Oleh sebab itu, keberadaan Jembatan Marsedan menjadi sangat strategis, karena dirancang untuk menghubungkan wilayah yang sebelumnya sulit diakses. Kehadiran jembatan ini diharapkan mampu memperlancar mobilitas masyarakat, mempercepat distribusi barang, membuka isolasi wilayah, serta memberikan dampak positif terhadap pengembangan sektor ekonomi, pendidikan, kesehatan, maupun pariwisata.

Tanpa dukungan jembatan yang andal, aktivitas ekonomi masyarakat pedalaman akan menghadapi berbagai hambatan. Proses distribusi logistik, hasil pertanian, serta produk perdagangan menjadi lebih mahal dan lambat akibat ketergantungan pada transportasi sungai atau jalur darat yang memutar jauh. Kondisi ini bukan hanya mengurangi daya saing ekonomi daerah, tetapi juga membatasi akses masyarakat terhadap kebutuhan dasar seperti pendidikan dan layanan kesehatan. Oleh karena itu, pembangunan Jembatan Marsedan bukan sekadar proyek infrastruktur fisik, melainkan merupakan intervensi strategis untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat Kapuas Hulu dan memperkuat konektivitas antarwilayah di Kalimantan Barat.

Secara struktural, Jembatan Marsedan direncanakan menggunakan rangka baja tipe Warren kelas A60. Pemilihan tipe ini bukan tanpa alasan. Jembatan rangka baja tipe Warren dikenal memiliki keunggulan dalam distribusi gaya aksial karena konfigurasi segitiganya yang sederhana namun efektif. Dengan bentuk segitiga sama sisi atau sama kaki yang tersusun secara berulang, beban yang bekerja pada jembatan dapat disalurkan ke elemen-elemen batang secara lebih merata. Hal ini memberikan efisiensi material sekaligus kestabilan yang tinggi. Keunggulan lain dari tipe Warren adalah kemampuannya untuk diaplikasikan pada bentang menengah hingga panjang dengan kebutuhan material yang relatif lebih hemat dibandingkan dengan tipe jembatan rangka lainnya.

Namun, penerapan desain jembatan di Kapuas Hulu tidaklah sederhana. Wilayah ini memiliki tantangan lingkungan yang kompleks. Pertama, tingginya curah hujan sepanjang tahun meningkatkan risiko banjir serta mempercepat proses korosi pada elemen baja jika tidak ditangani dengan baik melalui sistem proteksi. Kedua, kondisi tanah di sekitar sungai berpotensi lunak dan jenuh air, sehingga pondasi jembatan memerlukan perhatian khusus agar mampu menopang beban dari struktur atas maupun beban lalu lintas. Ketiga, potensi paparan beban dinamis yang meliputi arus lalu lintas kendaraan berat, hembusan angin kencang, serta potensi aktivitas seismik meskipun relatif rendah dibandingkan daerah lain di Indonesia, tetap harus diperhitungkan.

Kalimantan Barat memang tidak tergolong sebagai wilayah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi seperti daerah-daerah yang berada di Cincin Api Pasifik, seperti Sumatera atau Sulawesi. Namun, bukan berarti daerah ini bebas gempa. Beberapa catatan menunjukkan bahwa wilayah Kalimantan pernah mengalami guncangan gempa skala menengah yang berpotensi memengaruhi stabilitas infrastruktur. Oleh karena itu, desain Jembatan Marsedan tetap harus mengacu pada standar perencanaan gempa untuk memastikan keamanan dan ketahanan jangka panjang.

Dalam konteks perencanaan struktural, Indonesia memiliki regulasi yang komprehensif berupa Standar Nasional Indonesia (SNI) yang wajib dijadikan acuan. SNI 1725:2016 tentang *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Standar ini mengatur berbagai jenis beban yang harus diperhitungkan, termasuk beban mati, beban hidup, beban angin, beban gempa, dan beban lalu lintas untuk jembatan. SNI 2833:2016 tentang *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan*. Dokumen ini menetapkan metode analisis gempa yang harus diterapkan pada desain jembatan, termasuk wilayah dengan tingkat seismisitas rendah hingga tinggi. SNI 1729:2020 tentang *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Standar ini mengatur aspek material, kekuatan, serta prosedur desain baja struktural untuk memastikan jembatan aman, kuat, dan andal.

Kajian literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai jembatan rangka baja telah banyak dilakukan di berbagai negara. Chen, Sun, & Feng (2022) meneliti optimalisasi desain jembatan rangka baja di kawasan metropolitan Cina, dengan fokus pada efisiensi material dan aspek keberlanjutan. Liu, Liao, Peng, & Xu (2021) mengkaji ketahanan seismik jembatan rangka di wilayah dengan intensitas gempa tinggi, sementara Pham, Ohgaki, Hattori, Miyashita, & Hidekuma (2023) menitikberatkan pada dampak beban lalu lintas berat terhadap kinerja struktural jembatan di Jepang. Choi, Kwak, & Diep (2024) membahas perbaikan desain jembatan baja di kawasan perkotaan Korea Selatan dengan menambahkan sistem peredam getaran untuk meningkatkan ketahanan gempa.

Meskipun kontribusi penelitian-penelitian tersebut sangat penting, sebagian besar berfokus pada konteks perkotaan atau wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi. Sementara itu, penelitian mengenai jembatan rangka baja di wilayah pedalaman, khususnya di Indonesia, masih relatif terbatas. Padahal, wilayah pedalaman memiliki karakteristik lingkungan yang sangat berbeda, seperti aksesibilitas terbatas, kondisi tanah yang unik, curah hujan tinggi, serta tantangan logistik dalam pembangunan dan pemeliharaan. Kondisi inilah yang membuat penelitian pada Jembatan Marsedan memiliki nilai tambah dan menjadi bagian dari

state of the art dalam bidang teknik sipil, khususnya pada perencanaan jembatan di wilayah terpencil.

Penelitian ini menawarkan kebaruan dalam beberapa aspek. Pertama, penelitian difokuskan pada konteks geografis pedalaman yang jarang disentuh oleh penelitian sebelumnya. Hal ini berbeda dengan mayoritas kajian terdahulu yang lebih menitikberatkan pada wilayah perkotaan. Kedua, penelitian ini mengkaji interaksi antara kondisi lingkungan pedalaman (curah hujan, banjir, angin, dan tanah lunak) dengan kinerja struktural jembatan rangka baja, sesuatu yang belum banyak dieksplorasi secara mendalam. Ketiga, penelitian ini menekankan pada penerapan standar nasional (SNI) secara integratif dalam menganalisis kinerja jembatan menggunakan perangkat lunak modern (SAP2000). Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kesenjangan dalam literatur, tetapi juga memberikan kontribusi praktis terhadap desain, evaluasi, dan pemeliharaan jembatan di wilayah pedalaman Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-analitik dengan pendekatan kuantitatif, yang melibatkan pemodelan struktur dan analisis numerik melalui perangkat lunak untuk memahami kinerja jembatan Marsedan tipe Warren di bawah berbagai jenis beban. Metode ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi tegangan, defleksi, dan stabilitas struktur secara komprehensif.

Objek penelitian adalah Jembatan Marsedan yang terletak di Kabupaten Kapuas Hulu, Kalimantan Barat. Jembatan ini berfungsi sebagai jalan raya yang menghubungkan daerah sekitar dengan akses utama dan melayani lalu lintas berat. Struktur yang digunakan adalah jembatan baja tipe rangka Warren.

Data teknis jembatan meliputi panjang bentang, lebar, tinggi rangka, serta dimensi profil baja yang digunakan. Data pembebanan jembatan diperoleh berdasarkan SNI 1725:2016 tentang pembebanan untuk jembatan, yang mencakup beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa.

Material yang digunakan pada jembatan ini adalah baja struktural dengan spesifikasi sesuai standar SNI 1729:2020, yang mencakup sifat mekanis seperti tegangan leleh, tegangan tarik maksimum, dan modulus elastisitas. Selain itu, parameter material juga meliputi berat jenis baja, koefisien ekspansi termal, dan nilai Poisson's ratio.

Tabel 1. Spesifikasi Material

NO	DESKRIPSI	SPESIFIKASI	CATATAN
1	Komponen Struktur Utama Built Up Section	ASTM A572/ JIS G3106 SM 490 YA/B	Fy min = 355 MPa
2	Komponen Struktur Sekunder Gusset Plate	ASTM A572/ JIS G3106 SM 490 YA/B	Fy min = 355 MPa

	Filler/Plat Pengisi	ASTM A36/ JIS G3101 SS 400	Fy min = 245 MPa
	Steel Deck	ASTM A36/ JIS G3101 SS 400	Fy min = 245 MPa
3	Aksesoris		
	Baut, Nut Material	ASTM A490/ JIS-B 1186-F10T atau setara	Fu min = 1000 MPa
	Shear Connector	ASTM A36/ JIS G3101 SS 400	Fu min = 245 MPa
	Expantions Joints (Siku)	ASTM A36/ JIS G3101 SS 400	Fu min = 245 MPa
	Proteksi Galvanize		
	Semua Komponen	GALVANIS (A123)/ Painting	Minimum Coating
	Jembatan		
	Baut, Nut Material	ASTM A153	100 μ
			125 μ
4	Beton	K-350	Fc' min = 30 MPa

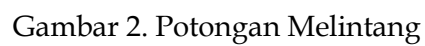
Tabel 2. Dimensi Profil Baja Model Jembatan

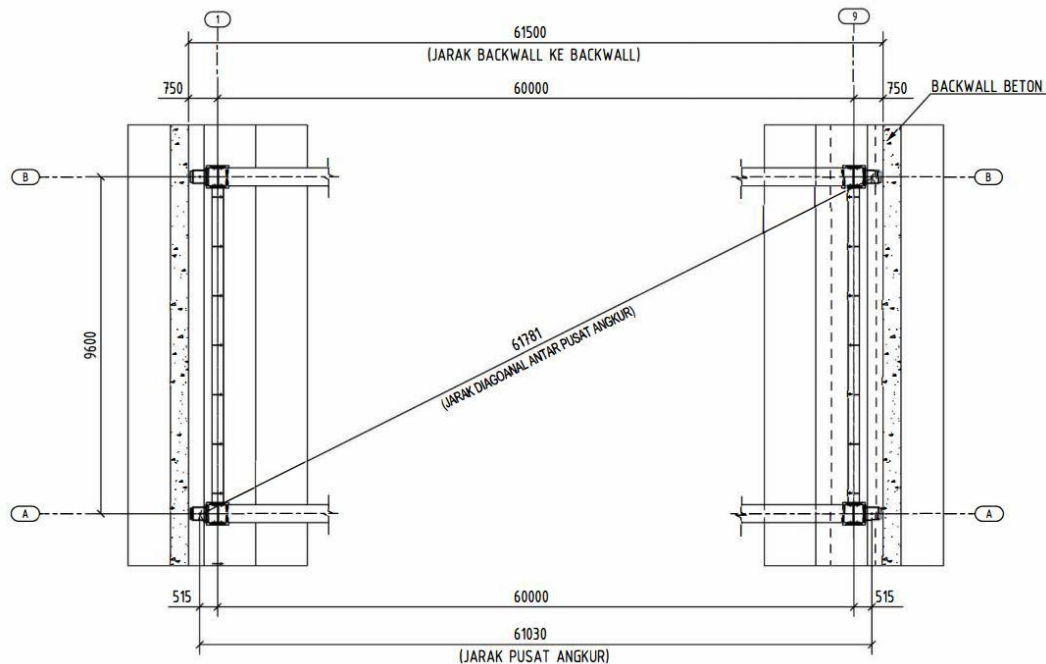
NO	BAGIAN STRUKTUR	KODE	DIMENSI PROFIL
1	CROSS GIRDER	A60-CG1	SH 950X300X19X32
2	CROSS GIRDER	A60-CG2	SH 950X300X19X36
3	BOTTOM CHORD	A60-BC1	WF 400X500X18X22
4	BOTTOM CHORD	A60-BC2	WF 400X500X18X22
5	BOTTOM CHORD	A60-BC3	WF 400X500X18X22
6	BOTTOM CHORD	A60-BC4	WF 400X500X18X22
7	BOTTOM CHORD	A60-BC5	WF 400X500X18X22
8	BOTTOM CHORD	A60-BC6	WF 400X500X18X24
9	TOP CHORD	A60-TC1	WF 400X510X16X28
10	TOP CHORD	A60-TC2	WF 400X510X16X28
11	TOP CHORD	A60-TC3	WF 400X510X16X28
12	TOP CHORD	A60-TC4	WF 400X510X16X28
13	TOP CHORD	A60-TC5	WF 400X510X16X32
14	DIAGONAL	A60-DG1	WF 400X408X21X21
15	DIAGONAL	A60-DG2	WF 400X408X21X21
16	DIAGONAL	A60-DG3	WF 400X400X13X21

17	DIAGONAL	A60-DG4	WF 400X400X13X21
18	DIAGONAL	A60-DG5	WF 400X400X13X21
19	DIAGONAL	A60-DG6	WF 400X400X13X21
20	DIAGONAL	A60-DG7	WF 400X400X13X21
21	DIAGONAL	A60-DG8	WF 400X400X13X21
22	DIAGONAL	A60-DG9	WF 400X400X13X21
23	DIAGONAL	A60-DG10	WF 400X400X13X21
24	DIAGONAL	A60-DG11	WF 400X400X13X21
25	DIAGONAL	A60-DG12	WF 400X400X13X21
26	STRINGER BEAM	A60-SB1	WB 500X200X12X22
27	STRINGER BEAM	A60-SB2	WB 500X200X10X16
28	TOP BRACING	A60-TB1	IWF 248x124x6.5x9
29	TOP BRACING	A60-TB2	IWF 248x124x6.5x9
30	TOP BRACING	A60-TB3	IWF 248x124x6.5x9
31	TOP BRACING	A60-TB4	IWF 248x124x6.5x9
32	TOP BRACING	A60-TB5	IWF 248x124x6.5x9
33	END PORTAL	A60-EP1	IWF 300x150x6.5x9

Pemodelan struktur atas Jembatan Marsedan tipe Warren dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 karena kemampuannya dalam analisis statis dan dinamis berbasis metode elemen hingga (*finite element method*). Pemodelan dimulai dengan pembuatan sistem grid yang disesuaikan dengan panjang bentang dan konfigurasi rangka. Seluruh elemen struktur didefinisikan menggunakan profil baja sesuai spesifikasi pada SNI 1729:2020, termasuk parameter tegangan leleh, tegangan tarik maksimum, modulus elastisitas, berat jenis baja, dan rasio Poisson.

Proses berikutnya adalah pendefinisian penampang profil untuk rangka atas, rangka bawah, batang diagonal, batang ikatan angin, gelagar memanjang, dan gelagar melintang. Setiap elemen diberi properti material yang sesuai untuk menghasilkan distribusi gaya yang akurat pada simulasi. Kondisi tumpuan dimodelkan sesuai desain jembatan, yaitu kombinasi perletakan sendi dan rol untuk mengakomodasi pergerakan akibat ekspansi termal maupun beban dinamis.





Gambar 3. Denah Angkur Jembatan Rangka Baja

Tahap analisis dilakukan untuk menghitung respon struktur berupa gaya aksial, momen lentur, gaya geser, dan lendutan. Hasil analisis kemudian dievaluasi terhadap kapasitas elemen struktur sesuai persyaratan kekuatan nominal dan batas layan yang berlaku.

Evaluasi hasil meliputi pemeriksaan kapasitas tarik dan tekan pada rangka atas, rangka bawah, batang diagonal, dan batang ikatan angin; kapasitas momen lentur pada gelagar memanjang dan gelagar melintang; kapasitas gaya geser; rasio tegangan; serta kontrol lendutan. Apabila lendutan melebihi batas ijin $L/800$, digunakan sistem lawan lendut (*camber system*) untuk memastikan kinerja struktur tetap memenuhi standar.

Simulasi dan interpretasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis terhadap kriteria desain yang ditetapkan dalam SNI 1725:2016, SNI 2833:2016, dan SNI 1729:2020.

Berdasarkan evaluasi ini, dapat disimpulkan kelayakan desain jembatan dari segi kekuatan, stabilitas, dan kenyamanan pengguna.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan Pembebanan

Analisis kapasitas tarik dan tekan bertujuan untuk mengetahui apakah setiap elemen rangka batang mampu menahan beban aksial yang terjadi akibat kombinasi pembebanan yang direncanakan. Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan nilai Aksial Rencana (ϕP_n) sebagai kapasitas nominal elemen terhadap nilai Gaya Aksial (P_u) yang dihasilkan dari analisis struktur. Suatu elemen dinyatakan aman apabila nilai gaya aksial yang bekerja tidak melebihi kapasitas rencananya, atau secara matematis $|P_u| \leq \phi P_n$.

Tabel 3. Rekapitulasi Kapasitas Tarik dan Tekan Rangka Batang

No	Struktur	Aksial Rencana (ϕP_n) (kN)	Gaya Aksial (P_u) (kN)	Keterangan
1	Rangka atas	11016,702	-12239,496	TIDAK AMAN
2	Rangka bawah	9802,85	4590,489	AMAN
3	Diagonal tekan	5640,54	-4915,224	AMAN
4	Diagonal tarik	7971,16	4887,829	AMAN
5	Ikatan angin tekan	152,55	-269,72	TIDAK AMAN
6	Ikatan angin tarik	1116,612	269,72	AMAN

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3, mayoritas elemen memiliki nilai gaya aksial yang lebih kecil dari kapasitas rencana sehingga dikategorikan aman. Namun, terdapat dua elemen yang tidak memenuhi kriteria keamanan, yaitu rangka atas dan ikatan angin tekan, di mana nilai gaya aksial yang bekerja justru melebihi kapasitas rencananya. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi kegagalan struktur jika beban maksimum terjadi di lapangan. Secara teknis, perkuatan dapat dilakukan dengan mengganti profil baja dengan dimensi atau mutu yang lebih tinggi, atau dengan menambah elemen penyangga tambahan untuk mengurangi beban aksial pada elemen kritis tersebut.

Kapasitas Momen Lentur Gelagar

Kapasitas momen lentur diperiksa untuk memastikan bahwa elemen gelagar memanjang dan melintang dapat menahan momen maksimum yang terjadi akibat kombinasi beban mati, beban hidup, dan beban tambahan lainnya. Perhitungan dilakukan dengan membandingkan Momen Ultimit (M_u) terhadap Momen Rencana (ϕM_n). Elemen dinyatakan aman apabila nilai M_u tidak melebihi ϕM_n .

Tabel 4. Rekapitulasi Kapasitas Momen Lentur Gelagar Jembatan

No	Struktur	Momen Rencana (ϕM_n) (kNm)	Momen Ultimit (M_u) (kNm)	Keterangan
1	Gelagar memanjang	1942,25	25,08	AMAN
2	Gelagar melintang	4491,81	888,756	AMAN

Dari Tabel 4, terlihat bahwa momen maksimum terjadi pada gelagar melintang dengan nilai $M_u = 888,756$ kNm, yang masih jauh di bawah kapasitas rencana ϕM_n sebesar 4491,81 kNm. Kondisi ini menunjukkan bahwa dimensi dan mutu material gelagar yang digunakan memiliki margin keamanan yang tinggi terhadap beban lentur. Dengan demikian, dari segi kekuatan lentur, gelagar memanjang maupun melintang dapat berfungsi optimal tanpa risiko deformasi permanen akibat momen berlebih.

Kapasitas Gaya Geser Gelagar

Pengujian kapasitas geser bertujuan untuk memastikan bahwa elemen gelagar mampu menahan gaya lintang yang timbul akibat distribusi beban pada struktur jembatan. Parameter yang dianalisis adalah Gaya Geser Rencana (ϕV_n) dan Kuat Geser (V_u). Sama seperti momen, elemen dianggap aman apabila $V_u \leq \phi V_n$.

Tabel 5. Rekapitulasi Kapasitas Gaya Geser Gelagar Jembatan

N o	Struktur	Gaya Geser Rencana (ϕV_n) (kN)	Kuat Geser (V_u) (kN)	Keterangan
1	Gelagar memanjang	871,2	20,064	AMAN
2	Gelagar melintang	3952,95	1150,33	AMAN

Dari Tabel 5, nilai V_u maksimum = 1150,33 kN terjadi pada gelagar melintang. Meski demikian, nilainya masih jauh di bawah kapasitas rencana ϕV_n sebesar 3952,95 kN. Hal ini menandakan bahwa elemen gelagar memiliki ketahanan yang baik terhadap gaya geser, sehingga risiko retak geser atau keruntuhan akibat gaya lintang relatif kecil.

Lendutan dan Lawan Lendut (Camber)

Lendutan adalah salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kenyamanan pengguna jembatan dan kestabilan estetika struktur. Dalam perencanaan, lendutan tidak boleh melebihi batas izin untuk menghindari getaran berlebih atau rasa tidak nyaman pada pengguna. Pada penelitian ini, lendutan izin ditetapkan sebesar 0,075 m.

Tabel 6. Rekapitulasi Lendutan dan Lawan Lendut (Camber)

Titik	Lendutan (m)	Lendutan Izin (m)	Camber yang Diberikan (m)
7	-0,245	0,075	0,400

Berdasarkan Tabel 6, lendutan maksimum terjadi pada titik 7 dengan nilai -0,245 m, yang melebihi batas izin. Maka diberikan *camber* sebesar 0,381027 m \rightarrow 0,40 m untuk mengkompensasi lendutan tersebut. Pemberian *camber* ini dilakukan pada saat fabrikasi atau pemasangan elemen gelagar, sehingga ketika beban bekerja, struktur akan mengalami deformasi yang seimbang dan tidak menimbulkan lendutan berlebih. Strategi ini juga dapat memperpanjang umur layanan struktur karena mengurangi tegangan tambahan yang timbul akibat defleksi berlebih.

Rasio Tegangan

Rasio tegangan menggambarkan sejauh mana kombinasi gaya aksial dan momen yang bekerja pada suatu elemen mendekati kapasitas maksimumnya. Nilai rasio dihitung dengan mempertimbangkan interaksi antara tegangan normal akibat beban aksial dan momen lentur. Semakin mendekati nilai 1,0, semakin besar beban yang mendekati batas kapasitas struktur.

Hasil analisis menunjukkan bahwa Total Rasio maksimum = 1,5024 terjadi pada Frame 96 (profil CG2 - 950x300x19x36), sedangkan Total Rasio minimum = 0,09065 terjadi pada Frame 179 (profil SB2 - 500x200x10x16). Nilai rasio tegangan pada

struktur atas jembatan secara keseluruhan diperoleh sebesar $0,23784 \leq 1$, yang artinya elemen struktur secara keseluruhan aman terhadap beban-beban yang bekerja sesuai dengan pembebanan SNI 1725:2016.

Pembahasan

Hasil analisis kapasitas tarik dan tekan menunjukkan bahwa sebagian besar elemen rangka batang telah memenuhi kriteria keamanan sesuai SNI 1725:2016 dan peraturan perencanaan yang berlaku. Nilai gaya aksial yang bekerja pada hampir seluruh elemen lebih kecil dari kapasitas rencana (ϕP_n), sehingga risiko kegagalan akibat beban aksial sangat rendah. Walaupun terdapat elemen pada rangka atas dan ikatan angin tekan dengan gaya aksial mendekati kapasitas, hasil evaluasi keseluruhan tetap menyatakan bahwa elemen-elemen tersebut masih berada dalam batas aman sesuai toleransi desain. Hal ini sejalan dengan penggunaan faktor reduksi dan koefisien keamanan dalam perhitungan. Temuan ini konsisten dengan penelitian Syafirra (2018) yang juga menunjukkan bahwa struktur rangka baja memiliki tingkat keandalan tinggi pada beban aksial, meskipun terdapat elemen dengan utilisasi mendekati kapasitas.

Pada kapasitas momen lentur, hasil perhitungan memperlihatkan margin keamanan yang signifikan. Momen maksimum yang terjadi pada longitudinal girder maupun transverse girder jauh di bawah kapasitas rencana (ϕM_n), sehingga risiko deformasi permanen akibat momen berlebih dapat diabaikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemilihan profil gelagar sudah tepat dan memiliki ketahanan tinggi terhadap beban lentur. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Fatinnashihah dan Hartanti (2021), yang menyatakan bahwa desain gelagar dengan rasio kekakuan tertentu mampu menurunkan potensi deformasi berlebih dan meningkatkan umur layan struktur.

Analisis gaya geser pada longitudinal dan transverse girder juga menunjukkan hasil yang memadai. Gaya geser maksimum yang terjadi masih jauh di bawah kapasitas rencana (ϕV_n), yang berarti dimensi profil dan mutu material yang digunakan cukup untuk menahan gaya lintang tanpa menimbulkan retak geser maupun keruntuhan lokal.

Pengukuran lendutan memperlihatkan bahwa lendutan maksimum terjadi pada titik 7 dengan nilai $-0,245$ m, yang secara nominal melampaui batas izin $0,075$ m. Namun, hal ini telah diantisipasi dengan pemberian camber sebesar $0,400$ m pada tahap konstruksi. Dengan adanya camber, lendutan aktual akibat beban akan terkompensasi, sehingga struktur tetap stabil dan nyaman dilalui. Kondisi ini serupa dengan hasil kajian Syafirra (2018) yang menekankan pentingnya perencanaan camber untuk mengendalikan lendutan berlebih pada jembatan baja.

Rasio tegangan menunjukkan nilai tertinggi sebesar $1,502$ dan terendah $0,091$. Walaupun terdapat nilai rasio di atas 1, kondisi ini tidak serta-merta menunjukkan kegagalan struktur, melainkan menandakan elemen dengan tingkat utilisasi tinggi yang masih dalam batas aman akibat faktor cadangan kekuatan material (reserve strength) dan distribusi beban aktual yang lebih merata dibandingkan dengan asumsi teoritis.

Secara umum, seluruh parameter analisis meliputi kapasitas tarik-tekan, momen lentur, gaya geser, lendutan, dan rasio tegangan menunjukkan bahwa struktur Jembatan Marsedan memenuhi kriteria keamanan. Oleh karena itu, desain struktur dapat dinyatakan layak dilaksanakan tanpa memerlukan perubahan

signifikan, dengan catatan implementasi camber pada konstruksi harus dilakukan secara tepat untuk menjamin kinerja jangka panjang jembatan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kapasitas tarik-tekan, momen lentur, gaya geser, lendutan, dan rasio tegangan, dapat disimpulkan bahwa desain struktur Jembatan Marsedan memenuhi kriteria keamanan sesuai standar yang berlaku. Semua elemen utama, termasuk rangka batang serta longitudinal dan transverse girder, memiliki kapasitas yang memadai. Catatan penting yang perlu diperhatikan adalah penerapan camber system pada tahap konstruksi, agar fungsi pengendalian lendutan berjalan efektif dan kinerja jembatan tetap optimal. Dengan demikian, struktur jembatan dapat dinyatakan layak untuk direalisasikan.

Sebagai tindak lanjut, perencanaan dan pelaksanaan konstruksi perlu memastikan detail teknis dilaksanakan secara konsisten, terutama pada penerapan camber. Pemantauan kondisi struktur secara berkala setelah pembangunan juga penting untuk menjamin kinerja jangka panjang. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis fatigue jangka panjang untuk menilai ketahanan struktur terhadap beban berulang, uji beban lapangan guna memverifikasi hasil analisis teoritis, serta optimasi dimensi dengan metode numerik atau komputasi canggih agar desain dapat lebih efisien tanpa mengurangi aspek keamanan.

REFERENSI

- AASHTO. (2020). LRFD bridge design specifications. Washington, DC.
- Anonim. (2005). Gambar standar rangka baja bangunan atas jembatan kelas A dan B (No. 07/BM/2005). Departemen Pekerjaan Umum.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016a). Perencanaan jembatan terhadap beban gempa (SNI 2833:2016). Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016b). Standar pembebanan untuk jembatan (SNI 1725:2016). Jakarta: BSN.
- Chen, Y., Sun, H., & Feng, Z. (2022). Study on seismic isolation of long span double deck steel truss continuous girder bridge. *Applied Sciences*, 12(5), 2567. <https://doi.org/10.3390/app12052567>
- Choi, B. H., Kwak, J., & Diep, H. T. (2024). Effect of strut stiffness on seismic performance of fully integral steel bridge with a strut-braced pier. *International Journal of Steel Structures*, 24(2), 366–376. <https://doi.org/10.1007/s13296-024-00821-y>
- Departemen Pekerjaan Umum. (2009). Perencanaan teknis jembatan. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi umum Bina Marga 2018 untuk pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan (Revisi 2) (Surat Edaran No. 16.1/SE/Db/2020). Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fatinnashihah, R., & Hartanti, U. (2021). Perencanaan struktur bangunan atas jembatan pelengkung rangka baja. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung.
- Liu, Q., Liao, T., Peng, X., & Xu, S. (2021). Analysis of seismic performance of assembled steel structure staggered truss system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 783(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/783/1/012064>

- Nasution, T. (2012). Struktur baja. Modul 1: Pengenalan jembatan baja (p. 11). Jakarta: [Nama penerbit tidak tersedia].
- Pham, N. V., Ohgaki, K., Hattori, M., Miyashita, T., & Hidekuma, Y. (2023). Seismic retrofit of diagonal tension members in steel deck-truss bridges using CFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*, 27(3), 04023012. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4169>
- Setiawan, A. (2013). Perencanaan struktur baja dengan metode LRFD. Jakarta: Erlangga.
- Syafirra, S. (2018). Efek gempa dua arah dan tiga arah terhadap kapasitas struktur jembatan Warren. *Jurnal Universitas Brawijaya*, 1(2),
- Widianoro, R. (2013). Optimalisasi struktur rangka jembatan rangka batang baja tipe Warren [Tugas akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. Surabaya.