STUDI ALTERNATIF PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN TIPE PELENGKUNG (NETWORK TIED ARCH) PADA JEMBATAN DUPLIKASI LILIBA KOTA KUPANG

Marsyan Antoneta Lanoe[1], Ester Priskasari [2], Mohammad Erfan [3]

[123)] Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malangs

Email: 2121106@scholar.itn.ac.id

ABSTRACT

This research is an alternative design study for the superstructure of the Liliba Duplication Bridge in Kupang City. The existing bridge, which uses a Warren truss steel frame, is considered to have less aesthetic value, which is crucial for supporting tourism in East Nusa Tenggara (NTT). Additionally, the existing bridge has two supporting piers that are at risk of damage from lava flows during the rainy season. Based on these issues, the bridge was redesigned with a network tied arch steel construction suitable for long spans. This design also adopts the distinctive curved shape of the traditional musical instrument, the Sasando, as an aesthetic element to create a new landmark that strengthens NTT's cultural identity[1111]. The design was carried out using the Load and Resistance Factor Design (LRFD) method. Structural analysis and modeling were performed using the Midas Civil software. This design includes determining the dimensions of the floor slab, longitudinal girders, transverse girders, main girders, wind bracing, as well as cables, bolted connections, and seismic isolation bearings.

Keywords: *Arch, Bearing,Bridge, LRFD,*Midas Civil, *Steel*

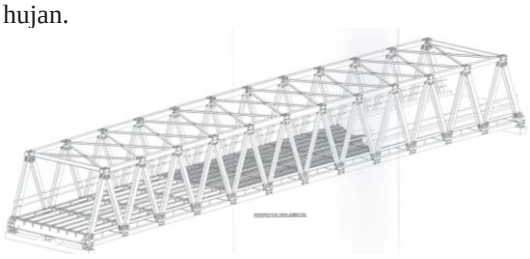
ABSTRAK

Penelitian ini merupakan studi alternatif perencanaan struktur atas Jembatan Duplikasi Liliba Kota Kupang. Jembatan eksisting yang menggunakan rangka baja tipe Warren truss dianggap kurang memiliki nilai estetika, padahal nilai estetika sangat penting untuk mendukung pariwisata di Nusa Tenggara Timur (NTT). Selain itu, jembatan eksisting dilengkapi dua pilar penyangga yang berisiko rusak akibat lahar saat musim hujan. Berdasarkan permasalahan tersebut, jembatan ini didesain ulang dengan konstruksi baja tipe pelengkung (*network tied arch*) untuk bentang panjang. Desain ini juga mengadopsi bentuk melengkung khas alat musik tradisional Sasando sebagai elemen estetika untuk menciptakan landmark baru yang memperkuat identitas budaya NTT. Perencanaan yang dilakukan menggunakan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD). Analisis dan pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan program bantu Midas Civil. Perencanaan ini mencakup penentuan dimensi pelat lantai, gelagar memanjang, gelagar melintang, gelagar induk, ikatan angin, serta kabel dan sambungan baut dan perletakan *seismic bearing*.

Kata kunci: Baja, Bearing, Jembatan, LRFD, ,Midas Civil, Pelengkung

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan komponen vital dari infrastruktur transportasi yang berfungsi mengatasi hambatan geografis dan memfasilitasi konektivitas antar wilayah. Provinsi Nusa Tenggara Timur (NTT) dengan potensi pariwisatanya membutuhkan infrastruktur yang fungsional dan juga estetis. Jembatan Duplikasi Liliba yang ada saat ini menggunakan struktur rangka baja tipe *Warren truss* yang dinilai kurang memiliki nilai estetika. Selain itu, jembatan eksisting ini dilengkapi dengan dua pilar penyangga di tengah sungai yang menghadapi risiko kerusakan akibat aliran lahar saat musim hujan.



Gambar 1 Gambar Jembatan Eksisting

Studi ini bertujuan merencanakan ulang Jembatan Duplikasi Liliba dengan struktur inovatif tipe *network tied arch* (pelengkung dengan kabel jaringan) yang efisien untuk bentang panjang tanpa memerlukan pilar tengah. Desain ini tidak hanya mengatasi masalah struktural dan hidrologis, tetapi juga mengedepankan aspek estetika dengan mengadopsi bentuk melengkung khas Sasando, alat musik tradisional NTT. Pendekatan ini diharapkan dapat menciptakan sebuah *landmark* baru yang memperkuat identitas budaya NTT dan mendukung sektor pariwisata daerah, selaras dengan keberhasilan desain arsitektur lokal pada Gedung Kantor Gubernur NTT.

2. DASAR TEORI

Dasar teori dalam perencanaan jembatan ini mencakup metode desain yang digunakan, pemilihan tipe struktur, analisis elemen-elemennya, serta perhitungan beban dan kontrol stabilitas yang mengacu pada standar nasional yang berlaku.

2.1 Metode Desain

Perencanaan jembatan ini menggunakan metode *Load and Resistance Factor Design (LRFD*) atau dalam Bahasa Indonesia disebut Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBK). Metode ini merupakan pendekatan desain modern yang memperhitungkan ketidakpastian dalam rekayasa struktur. Prinsip utamanya adalah memastikan bahwa kekuatan nominal struktur yang direduksi oleh faktor tahanan (ϕ) lebih besar daripada atau sama dengan beban terfaktor yang merupakan hasil perkalian antara beban layan (Q) dengan faktor beban (γ).Secara matematis, prinsip ini dirumuskan sebagai:

$$Rn \geq \Sigma\gamma iQi$$

Di mana:

ϕ = Faktor Reduksi Tahanan (kurang dari 1)

Rn = Tahanan Nominal (kekuatan ultimit material atau komponen)

γ = Faktor Beban (lebih dari 1 untuk beban yang menambah efek gaya dan kurang dari 1 untuk beban yang mengurangi)

Qi = Beban Layan (beban aktual yang bekerja)

Metode LRFD memberikan tingkat keamanan yang lebih konsisten dibandingkan metode desain lama karena menerapkan faktor keamanan yang berbeda untuk jenis beban yang berbeda (beban mati, beban hidup, beban lingkungan) berdasarkan tingkat ketidakpastiannya.

2.2 Jembatan Pelengkung (Arch Bridge)

Jembatan pelengkung dipilih sebagai alternatif karena keunggulan struktural dan estetikanya.

- Prinsip Kerja: Struktur ini mentransfer beban vertikal dari dek jembatan menjadi gaya tekan yang disalurkan di sepanjang busur lengkung menuju tumpuan (abutment) di kedua ujungnya. Karena elemen lengkung utamanya menahan gaya tekan, material seperti beton atau baja dapat digunakan secara efisien.
- Tipe Network Tied Arch: Jembatan ini secara spesifik menggunakan tipe pelengkung terikat dengan kabel jaringan (network tied arch).
- Tipe Terikat (Tied Arch): Gaya horizontal (gaya dorong) dari busur tidak ditransfer ke tanah, melainkan ditahan oleh elemen pengikat horizontal, yang dalam hal ini adalah gelagar induk memanjang. Hal ini membuat pondasi jembatan bisa lebih kecil.
- Tipe Jaringan (Network): Kabel penggantung tidak dipasang vertikal, melainkan diagonal dan saling bersilangan. Konfigurasi ini memberikan kekakuan lateral yang jauh lebih baik dibandingkan penggantung vertikal, sehingga lebih tahan terhadap beban angin.

2.3 Elemen Struktur Atas Jembatan Pelengkung

Struktur atas (superstructure) adalah bagian yang menerima beban lalu lintas secara langsung dan menyalurkannya ke struktur bawah. Komponen utamanya meliputi:

Batang Lengkung (Busur Utama): Merupakan elemen struktural primer yang bekerja menahan gaya tekan dan menyalurkan beban ke pondasi.

Sistem Lantai Kendaraan: Berfungsi mendukung lalu lintas dan mendistribusikan beban ke elemen penggantung. Terdiri dari:

- Pelat Lantai (*Deck Slab*): Komponen horizontal yang langsung menerima beban roda kendaraan.
- Gelagar Memanjang (*Stringers*): Balok yang membentang searah dengan aliran lalu lintas, berfungsi menopang pelat lantai.

- Gelagar Melintang (*Floor Beams*): Balok yang membentang melintang jembatan, berfungsi menopang gelagar memanjang dan mentransfer beban ke kabel penggantung.
- Ikatan Angin (*Bracing System):* Elemen pengaku yang memastikan integritas geometri jembatan dan mencegah terjadinya tekuk lateral (pergeseran ke samping) pada busur akibat gaya angin atau gempa. Pada desain ini digunakan konfigurasi X-bracing.
- Kabel Penggantung (*Hanger*): Elemen yang bekerja menahan gaya tarik murni, berfungsi mentransfer beban dari sistem lantai ke busur utama.
- Sambungan: Menggunakan sambungan baut mutu tinggi (A325 dan A490) yang dirancang sebagai sambungan tipe tumpu atau slip-kritis untuk menahan geser, tarik, dan momen pada titik pertemuan antar elemen baja.
- Sistem Perletakan: Menggunakan Seismic Isolation Bearings (tipe *Lead Rubber Bearing - LRB*) yang berfungsi mentransfer beban dari struktur atas ke pondasi, sekaligus meredam energi getaran akibat gempa untuk melindungi struktur jembatan.

3. METODELOGI

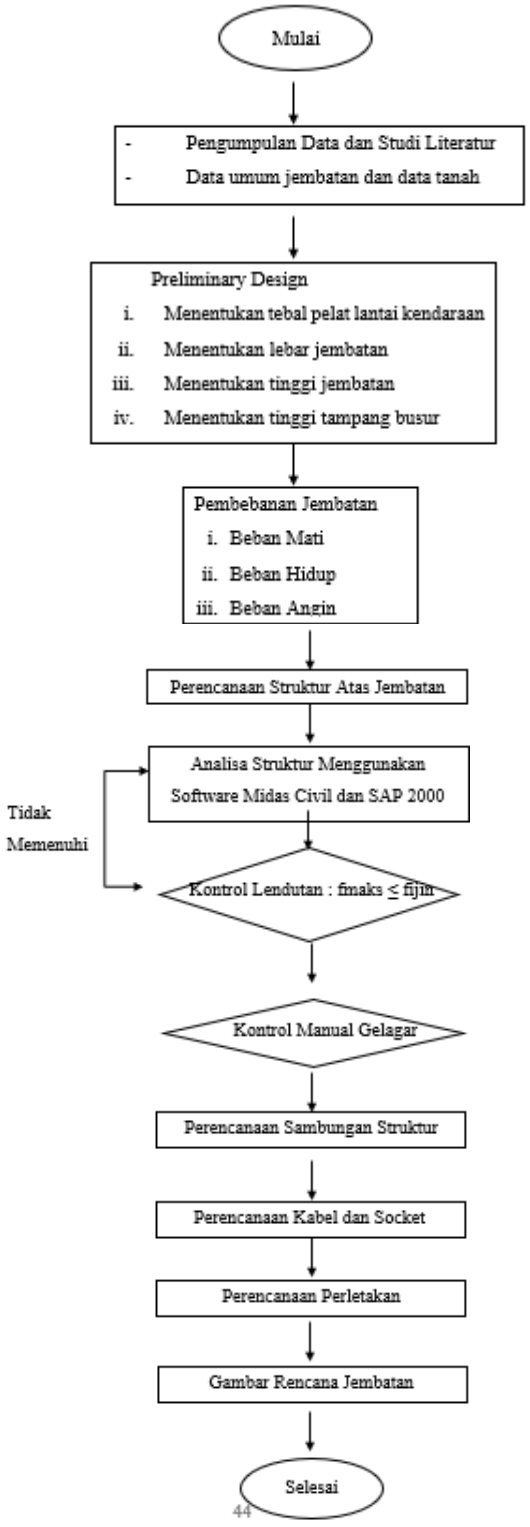
3.1 Alur Perencanaan

Metode penelitian yang digunakan adalah studi alternatif perencanaan struktur atas Jembatan Duplikasi Liliba di Kota Kupang. Data jembatan yang direncanakan adalah sebagai berikut:

- Panjang Jembatan: 140 m
- Lebar Jembatan: 9 m (7 m jalur lalu lintas dan 2 x 1 m trotoar)
- Tipe Jembatan: Jembatan Busur Baja Diagonal (*Network Tied Arch*)
- Metode Desain: *Load and Resistance Factor Design* (LRFD)

Tahapan perencanaan dimulai dengan *preliminary design* untuk menentukan dimensi awal struktur seperti tinggi busur, tebal pelat, dan dimensi tampang busur. Selanjutnya, dilakukan analisis pembebanan berdasarkan standar SNI 1725-2016, yang mencakup beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa.

Pemodelan dan analisis struktur dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Midas Civil untuk mendapatkan gaya-gaya dalam yang bekerja pada setiap elemen. Berdasarkan hasil analisis, dilakukan perencanaan detail dan 758ontrol kapasitas untuk seluruh komponen struktur atas, meliputi pelat lantai, gelagar memanjang dan melintang, gelagar induk pelengkung dan memanjang, ikatan angin, kabel penggantung, sambungan baut, serta perletakan jembatan.



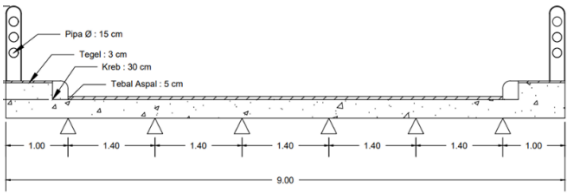
3.2 Preliminary Design

- Pelat Lantai

Tebal minimum pelat lantai jembatan (ts) yang berfungsi sebagai perkerasan kendaraan harus memenuhi dua persyaratan yang ditetapkan. Persyaratan tersebut meliputi:

ts ≥ 200 mm dan ts ≥ 100 + 40.L (mm)

Maka digunakan tebal pelat lantai yaitu ts = 240 mm = 24 cm



Gambar 2 Lantai Kendaraan dan Trotoar

- Lebar Jembatan

Lebar jembatan harus memenuhi persyaratan sesuai dengan Persamaan 3.2, namun untuk perancangan Jembatan Liliba ditentukan bahwa lebar jembatan yaitu 9 m, dengan spesifikasi 1 jalur kendaraan terdapat 2 lajur kendaraan dengan lebar 3,5 m, serta terdapat jalur untuk pejalan kaki selebar 1 m di setiap sisi jembatan.

Lebar Jembatan : 9 m

- Tinggi Jembatan

Tinggi jembatan (f) harus memenuhi persyaratan sesuai dengan Persamaan :

$$\frac{1}{6} \leq \frac{f}{L} \leq \frac{1}{5}$$

Keterangan :

- f : Tinggi busur
- L : Panjang jembatan

Dengan bentang 140 m, didapatkan tinggi jembatan 24 m.

- Tinggi Tampang Busur

Tinggi penampang busur menggunakan rangka baja, maka tinggi penampang busur

harus memenuhi persyaratan sesuai Persamaan :

$$\frac{1}{40} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{25}$$

Keterangan :

- t : Tinggi tampang busur
- L : Panjang jembatan

Maka, digunakan tinggi penampang jembatan busur sebesar 3.5 m.

- Panjang Panel

Panjang Panel harus memenuhi persyaratan sesuai Persamaan:

$$Panjang\ Panel \leq \frac{1}{15} L$$

Maka, digunakan panjang tiap panel sebesar 9 m

3.3 Analisis Pembebanan Jembatan

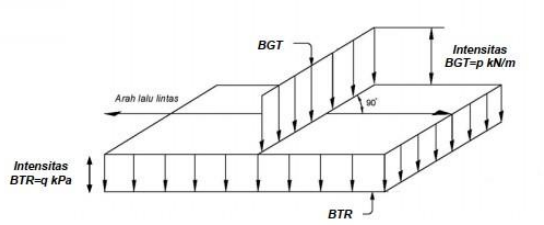
Perencanaan struktur harus memperhitungkan kombinasi pembebanan paling kritis sesuai SNI 1725:2016.Beban utama yang diperhitungkan antara lain:

- Beban Mati (MS & MA): Beban akibat berat sendiri semua elemen struktural (MS) dan elemen non-struktural permanen seperti aspal dan trotoar (MA).
  Berat jenis material untuk beban mati didasarkan pada SNI 1725-2016 Pasal 7.1 dapat dilihat pada Tabel Berat Jenis Material untuk Beban Mati :

No.	Bahan	Berat isi (kN/m³)	Kerapatan massa (kg/m³)
1	Lapisan permukaan beraspal (*bituminous wearing surfaces*)	22,0	2245
2	Besi tuang (*cast iron*)	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (*compacted sand, silt or clay*)	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan (*rolled gravel, macadam or ballast*)	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal (*asphalt concrete*)	22,0	2245
6	Beton ringan (*low density*)	12,25-19,6	1250-2000
7	Beton f'_c < 35 MPa	22,0-25,0	2320
	35 < f'_c <105 MPa	22 + 0,022 f'_c	2240 + 2,29 f'_c
8	Baja (*steel*)	78,5	7850
9	Kayu (ringan)	7,8	800
10	Kayu keras (*hard wood*)	11,0	1125

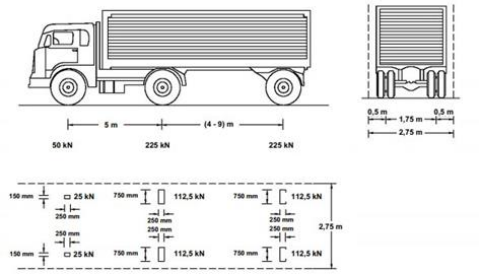
Tabel 1 Berat Jenis Material
(Sumber : SNI 1725-2016 Tabel 2)

- Beban Lalu Lintas (LL):



Gambar 3 Beban Lajur D

  - Beban Lajur "D": Mensimulasikan kondisi lalu lintas padat dan terdiri dari Beban Terbagi Rata (BTR) di sepanjang jembatan dan Beban Garis Terpusat (BGT) yang bekerja tegak lurus arah lalu lintas.
- Beban Truk "T": Mensimulasikan satu kendaraan berat dengan beban gandar terpusat pada posisi paling kritis.



Gambar 4 Beban Truk

- Faktor Beban Dinamis (FBD): Faktor pengali untuk beban BGT dan Truk "T" untuk memperhitungkan efek kejut dari kendaraan yang bergerak.
- Gaya Rem (TB): Gaya horizontal yang bekerja akibat pengereman kendaraan.
- Beban Angin (EWs): Tekanan angin yang bekerja pada seluruh permukaan jembatan dan kendaraan di atasnya.
- Beban Gempa (Eq): Gaya horizontal akibat gempa yang besarnya ditentukan berdasarkan lokasi jembatan (zona gempa) dan kondisi tanah setempat.

2.4 Kontrol Stabilitas dan Kekuatan

Setelah gaya-gaya dalam dari hasil analisis pembebanan didapatkan, setiap elemen baja harus diperiksa kapasitasnya terhadap berbagai mode keruntuhan sesuai SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi Bangunan Baja Struktural.

Kontrol ini meliputi:

- Kapasitas Tekan: Memastikan elemen yang menahan tekan (seperti busur utama) tidak mengalami tekuk lentur, tekuk torsi, atau tekuk torsi-lentur.

$$p_n = A_g F_{cr}$$

dimana :

Pn = kekuatan tekan nominal

Ag = luas penampang bruto

Fcr = tegangan kritis

- Kapasitas Tarik: Memastikan elemen yang menahan tarik (seperti kabel dan gelagar induk memanjang) tidak mengalami leleh pada penampang bruto atau putus pada penampang netonya.
- Kapasitas Lentur: Memastikan elemen balok (gelagar) tidak mengalami tekuk lokal pada sayap atau badan, serta tekuk torsi lateral.
- Kapasitas Geser: Memastikan badan profil baja mampu menahan gaya geser tanpa mengalami keruntuhan.

$$V_n = 0{,}6.\ F_y.\ A_w.\ C_v$$

Dimana:

- Vn = kekuatan geser nominal
- Fy = tegangan leleh material
- Aw = luas badan yang menahan geser
  = d × tw
- d = tinggi penampang
- tw = tebal badan

  Cv = koefisien geser badan yang bergantung pada rasio h/tw

- Kontrol Interaksi: Memverifikasi elemen yang mengalami kombinasi gaya aksial dan momen lentur secara bersamaan.

a) Jika $\frac{pu}{pc} \geq 0{,}2$

maka digunakan kontrol :

$$\frac{pu}{pc} + \frac{8}{9}\left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy}\right) \leq 1$$

b) Jika $\frac{pu}{pc} \leq 0{,}2$

maka digunakan kontrol :

$$\frac{pu}{2pc} + \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy}\right) \leq \mathbf{1}$$

- Kontrol Lendutan: Membatasi lendutan (defleksi) yang terjadi pada jembatan agar tetap dalam batas aman dan nyaman bagi pengguna.

f ada < f ijin

Dimana, *f ijin* berdasarkan (SNI 03-1729-2020 hal. 15), didapatkan sebesar:

f ijin = $\frac{1}{360}$ × L

Dengan:

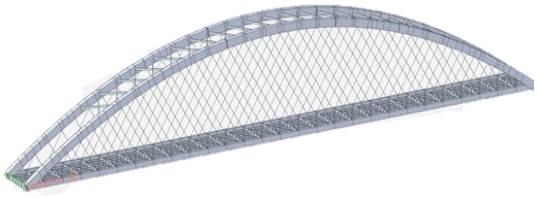
L = Panjang gelagar, (cm)

2.5 Analisis Menggunakan Perangkat Lunak

Untuk struktur jembatan yang kompleks seperti jembatan pelengkung bentang panjang, analisis struktur dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga seperti Midas Civil. Perangkat lunak ini digunakan untuk:

Membuat model struktur 3D yang akurat.Mengaplikasikan berbagai jenis beban dan kombinasi pembebanan sesuai standar. Menghitung gaya-gaya dalam (gaya aksial, geser, momen, torsi) yang terjadi pada setiap elemen. Menganalisis perilaku dinamis struktur terhadap beban gempa.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN



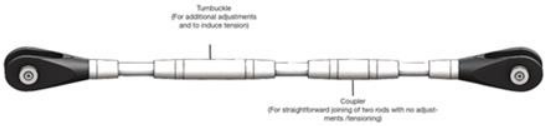
Gambar 5 Hasil Perencanaan Ulang Menggunakan Midas Civil

Hasil dari analisis perencanaan struktur atas Jembatan Duplikasi Liliba adalah sebagai berikut:

- **Preliminary Design**: Berdasarkan panjang bentang 140 m, ditetapkan tinggi busur jembatan sebesar 24 m, tinggi tampang busur 3,5 m, dan tebal pelat lantai kendaraan 240 mm.
- **Perencanaan Pelat Lantai dan Gelagar**: Pelat lantai beton direncanakan menggunakan tulangan pokok D16-100 mm pada daerah tumpuan dan D16-150 mm pada daerah lapangan. Gelagar memanjang didesain menggunakan profil H 294x200x8x12 dan gelagar melintang menggunakan profil WF 800x300x14x28. Kedua sistem gelagar

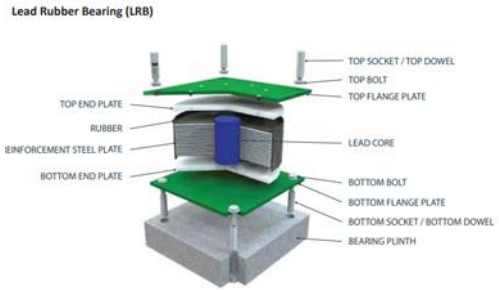
direncanakan sebagai struktur komposit dengan beton menggunakan *shear connector*.

- **Perencanaan Struktur Utama**: Struktur utama jembatan menggunakan profil *built-up* baja. Gelagar induk pelengkung menggunakan profil Boks 1000x500x50x50, sedangkan gelagar induk memanjang (pengikat busur) menggunakan profil Boks 800x500x30x30. Untuk ikatan angin atas digunakan profil Boks 300x300x9 dan ikatan angin bawah menggunakan profil B 200x200x9. Seluruh elemen telah diperiksa terhadap kapasitas aksial, lentur, geser, dan interaksinya sesuai ketentuan SNI 1729:2020.
- **Perencanaan Kabel** : Untuk kabel penggantung digunakan produk *tension rods* Macalloy 460 (M52). Sambungan antar elemen baja direncanakan menggunakan baut mutu tinggi A490 dengan berbagai diameter yang telah melalui kontrol kapasitas tumpu, slip-kritis, dan geser blok.



Gambar 6 *Tension rods* Macalloy 460 (M52).

- **Perletakan** : Perletakan, digunakan *Lead Rubber Bearing* (LRB) berdiameter 500 mm yang berfungsi untuk mengakomodasi beban serta isolasi seismik.



Gambar 7 Perletakan, digunakan *Lead Rubber Bearing* (LRB)

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan perencanaan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut[64]:

1. **Pelat Lantai**: Direncanakan menggunakan tulangan pokok D16-100 mm dan tulangan bagi D10-200 mm.
2. **Gelagar**: Gelagar memanjang menggunakan profil WF 300×300×9×14, sedangkan gelagar melintang menggunakan profil WF 800×300×14×26.
3. **Struktur Utama**: Gelagar induk pelengkung menggunakan profil Boks 1000×400×40×40, gelagar induk memanjang menggunakan Boks 800×400×30×30, ikatan angin atas menggunakan Boks 300×300×9, dan ikatan angin bawah menggunakan Boks 200×200×9.
4. **Kabel Penggantung**: Menggunakan sistem kabel dan *socket* dari Macalloy 460.
5. **Sambungan**: Seluruh sambungan utama menggunakan baut mutu tinggi A490 dengan diameter yang bervariasi. Sambungan las sudut E60XX juga digunakan pada beberapa bagian seperti sambungan kabel penggantung.
6. **Perletakan**: Perletakan jembatan direncanakan menggunakan *Lead Rubber Bearing* berdiameter 500 mm.

DAFTAR PUSTAKA

AASHTO. (2014). *LRFD Bridge Design Specifications*.

Alghiffary, R. (2021). Perancangan Jembatan Semujurdengan Jembatan Busur Box Bajadiagonal Sebagai Icon Kota Pangkalpinang.

American Institute Of Steel Construction. (2005). *Steel Construction Manual*.

Anonim. (2015a). Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural Badan Standardisasi Nasional. www.bsn.go.id

Anonim. (2015b). Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, No. 07/SE/M/2015; Tentang Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan.

Anonim. (2016a). Pembebanan untuk jembatan Badan SNI 1725:2016. www.bsn.go.id

Anonim. (2016b). Standar Nasional Indonesia 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan. www.bsn.go.id

Anonim. (2016c). Standar Nasional Indonesia 2833:2016 Perencanaan jembatan terhadap beban gempa. www.bsn.go.id

Anonim. (2018). Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, No. 02/SE/M/2018; Tentang Pedoman Perancangan jembatan pelengkung.

Anonim. (2019). Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, No. 02/SE/Db/2019; Tentang Panduan TekN is Pelaksanaan Jembatan.

Anonim. (2020). Standar Nasional Indonesia 1729:2020 Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural.

Anonim. (2021). Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, No. 06/SE/Db/2021; Tentang Panduan Praktis Perencanaan TekN is Jembatan.

Chen, W. F., & Duan, L. (2014). Bridge engineering handbook: Seismic design, second edition. In *Bridge Engineering Handbook: Seismic Design, Second Edition*. https://doi.org/10.1201/b15663

Delyanet, D., & Pawa, J. (2024). View of Penilaian Estetika Jalan Kota untuk Mendukung Pariwisata Berkelanjutan Kota Sambas.

Kim, J., Kim, R., & Eberle, J. (2013). *Simplified LRFD Bridge Design*.

Kurniawan, T. (2022). PEMODELAN PENGGUNAAN FLUID VISCOUS DAMPER(FVD) PADA BANGUNAN GEDUNGMALANG CREATIVE CENTER.

MCCormac, J., & Csernak, S. (2012). *Structural Steel Design*.

Morais da Costa, B. (2013). *Design and Analysis of a Network Arch Bridge*. https://www.researchgate.net/publication/348744087

Oentoeng. (2000). *Konstruksi Baja*.

Soedarsono, D. (1993). *Konstruksi Jalan Raya*.

Supriyadi, B., & Muntohar, A. (2007). *JEMBATAN*.

Williams, A. (2012). *Steel Structures Design*. www.iccsafe.org