

KINERJA SAMBUNGAN SOCKET JEMBATAN PELENGKUNG: STUDI KASUS LILIBA

Vega Aditama¹, Krisna Febrian Anugerahputra², Hadi Surya Wibawanto³, dan Mohammad Erfan⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

⁴Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

ABSTRAK

Sambungan socket merupakan komponen penting dalam sistem struktur jembatan pelengkung, khususnya pada tipe *network tied arch*, karena berfungsi mentransfer gaya tarik dari kabel hanger ke elemen utama struktur. Kinerja sambungan ini sangat berpengaruh terhadap keamanan dan keandalan struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang jelas mengenai perilaku tegangan dan deformasi yang terjadi pada sambungan socket. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sambungan socket pada Jembatan Duplikasi Liliba di Kota Kupang berdasarkan distribusi tegangan dan deformasi. Metode yang digunakan adalah pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS, menggunakan pembebanan statik yang merepresentasikan kondisi kerja aktual struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan maksimum terkonsentrasi pada area lug dan sudut bagian dalam socket dengan nilai mencapai sekitar 99 MPa, sedangkan deformasi maksimum terjadi pada bagian lug sebesar sekitar 0,79 mm dan menurun secara bertahap menuju badan socket. Pola distribusi ini menunjukkan bahwa sambungan mampu menyalurkan gaya secara efektif dari titik pembebanan ke elemen struktur lainnya. Secara umum, sambungan socket berada dalam kondisi aman terhadap beban statik. Namun demikian, adanya konsentrasi tegangan pada area tertentu menunjukkan potensi terjadinya kelelahan material dalam jangka panjang. Oleh karena itu, diperlukan perhatian terhadap desain geometri dan detail sambungan untuk meningkatkan kinerja dan umur layan struktur.

Kata kunci: sambungan socket, jembatan pelengkung, tegangan, deformasi, studi kasus

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jembatan merupakan salah satu aspek penting dalam mendukung konektivitas wilayah dan pertumbuhan ekonomi, khususnya di daerah berkembang seperti Kota Kupang. Jembatan tidak hanya berfungsi sebagai sarana transportasi, tetapi juga sebagai bagian dari sistem infrastruktur strategis yang harus dirancang dengan tingkat keamanan dan keandalan yang tinggi. Salah satu tipe jembatan yang banyak digunakan untuk bentang panjang adalah jembatan pelengkung (*arch bridge*), yang memiliki keunggulan dalam mendistribusikan beban melalui mekanisme gaya tekan ke arah tumpuan secara efisien.

Pada jembatan pelengkung tipe *network tied arch*, sistem struktur terdiri dari elemen utama seperti arch rib, tie girder, dan hanger yang saling terhubung dan bekerja secara simultan dalam menyalurkan beban. Hanger berfungsi sebagai elemen tarik yang menghubungkan pelat lantai jembatan dengan struktur pelengkung. Dalam sistem ini, sambungan antara hanger dengan elemen struktur utama umumnya menggunakan sambungan socket. Sambungan socket memiliki peran penting dalam mentransfer gaya tarik dari kabel hanger ke struktur utama, sehingga menjadi salah satu komponen kritis dalam sistem struktur jembatan.

Namun demikian, sambungan socket sering kali menjadi titik yang rentan terhadap konsentrasi tegangan. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan geometri yang cukup signifikan pada bagian sambungan, seperti pada area lug dan bagian transisi antara elemen yang terhubung. Kondisi tersebut dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata dan berpotensi menimbulkan tegangan lokal yang tinggi. Jika tidak diperhatikan dengan baik, kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan struktural, terutama akibat kelelahan material (*fatigue*) yang terjadi secara bertahap dalam jangka panjang (Zhou et al., 2024; Su et al., 2024).

Seiring dengan perkembangan teknologi analisis struktur, metode elemen hingga (*Finite Element Method / FEM*) menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menganalisis perilaku struktur secara detail. Metode ini memungkinkan evaluasi distribusi tegangan dan deformasi pada elemen struktur yang kompleks, termasuk pada sambungan socket yang memiliki bentuk geometri tidak sederhana. Penggunaan perangkat lunak seperti ABAQUS memungkinkan pemodelan yang lebih akurat terhadap kondisi aktual struktur, sehingga hasil analisis dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kinerja sambungan (Zhu et al., 2025).

Meskipun berbagai penelitian mengenai sambungan socket telah dilakukan, sebagian besar studi masih berfokus pada pendekatan analisis teknis yang kompleks dan belum banyak memberikan penjelasan yang mudah dipahami mengenai bagaimana sambungan tersebut bekerja dalam sistem struktur secara keseluruhan. Selain itu, penelitian yang berbasis pada kondisi aktual jembatan di Indonesia, khususnya pada jembatan pelengkung tipe *network tied arch*, masih relatif terbatas. Padahal, kondisi lingkungan lokal seperti iklim tropis, kelembaban tinggi, serta variasi beban lalu lintas dapat mempengaruhi kinerja sambungan dalam jangka panjang.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai kinerja sambungan socket pada jembatan pelengkung melalui analisis tegangan dan deformasi. Studi ini mengambil kasus pada Jembatan Duplikasi Liliba di Kota Kupang sebagai objek penelitian. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan numerik berbasis FEM untuk mengidentifikasi distribusi tegangan, lokasi konsentrasi tegangan, serta pola deformasi yang terjadi pada sambungan socket.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan memahami kinerja sambungan socket berdasarkan perilaku tegangan dan deformasi, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih aplikatif dalam perencanaan dan evaluasi struktur jembatan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam meningkatkan kualitas desain sambungan serta mendukung pengembangan infrastruktur jembatan yang lebih aman dan andal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Jembatan pelengkung

Jembatan pelengkung (*arch bridge*) merupakan salah satu jenis struktur yang banyak digunakan untuk bentang panjang karena efisiensinya dalam mendistribusikan beban. Pada sistem ini, beban vertikal yang bekerja pada struktur akan dialirkan melalui lengkungan menjadi gaya tekan yang diteruskan ke tumpuan. Mekanisme ini membuat jembatan pelengkung mampu mengurangi momen lentur dibandingkan dengan sistem balok konvensional, sehingga lebih efisien dalam penggunaan material.

Pada perkembangan modern, tipe jembatan pelengkung yang banyak digunakan adalah *network tied arch*. Pada sistem ini, gaya horizontal yang dihasilkan oleh arch ditahan oleh elemen tie girder, sementara hanger disusun secara diagonal dan saling bersilangan. Konfigurasi ini menghasilkan distribusi gaya yang lebih merata, mengurangi deformasi, serta meningkatkan stabilitas struktur terhadap beban dinamik seperti lalu lintas dan angin. Selain itu, pola hanger yang menyilang juga memberikan nilai estetika yang tinggi sehingga sering digunakan sebagai ikon infrastruktur kota.

Sambungan socket pada struktur jembatan

Sambungan merupakan elemen penting dalam struktur baja, karena berfungsi untuk menghubungkan antar elemen sehingga dapat bekerja sebagai satu kesatuan sistem. Pada jembatan pelengkung, sambungan antara hanger dan elemen struktur utama umumnya menggunakan sambungan socket. Sambungan ini dirancang untuk menyalurkan gaya tarik yang besar dari kabel hanger ke struktur utama secara aman.

Secara umum, sambungan socket bekerja dengan prinsip transfer gaya aksial dari kabel ke badan socket melalui mekanisme kontak dan gesekan. Namun, bentuk geometri sambungan yang kompleks sering menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada bagian tertentu, seperti pada area lug dan sudut dalam socket. Kondisi ini menjadikan sambungan socket sebagai salah satu titik kritis dalam struktur jembatan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja sambungan socket sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain geometri sambungan, material yang digunakan, serta kondisi pembebanan. Variasi kecil pada bentuk atau dimensi socket dapat menyebabkan perubahan signifikan pada distribusi tegangan, sehingga diperlukan analisis yang lebih detail untuk memahami perilaku sambungan ini (Zhou et al., 2024).

Perilaku tegangan dan deformasi

Dalam analisis struktur, tegangan dan deformasi merupakan dua parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu elemen. Tegangan menunjukkan besarnya gaya internal yang terjadi dalam material akibat pembebanan, sedangkan deformasi menunjukkan perubahan bentuk atau perpindahan yang terjadi pada struktur.

Distribusi tegangan yang tidak merata dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada area tertentu, yang berpotensi menjadi titik awal kerusakan. Sementara itu, deformasi yang berlebihan dapat mengindikasikan bahwa struktur mengalami ketidakstabilan atau kekakuan yang tidak memadai. Oleh karena itu, analisis terhadap kedua parameter ini menjadi penting dalam menilai keamanan dan keandalan struktur.

Pada sambungan socket, tegangan biasanya terkonsentrasi pada area transisi geometri, sedangkan deformasi maksimum umumnya terjadi pada titik masuk beban. Pola ini perlu dipahami dengan baik agar dapat dilakukan perbaikan desain yang tepat, seperti penghalusan geometri atau penambahan elemen pengaku.

Metode elemen hingga (Finite Element Method)

Metode elemen hingga (*Finite Element Method* / FEM) merupakan salah satu metode numerik yang banyak digunakan dalam analisis struktur modern. Metode ini bekerja dengan membagi struktur menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) yang saling terhubung, sehingga memungkinkan analisis yang lebih detail terhadap distribusi tegangan dan deformasi.

Keunggulan FEM terletak pada kemampuannya dalam menganalisis struktur dengan geometri kompleks dan kondisi pembebanan yang bervariasi. Dalam konteks sambungan socket, FEM memungkinkan identifikasi lokasi konsentrasi tegangan serta evaluasi deformasi lokal yang sulit dianalisis dengan metode konvensional. Perangkat lunak seperti ABAQUS banyak digunakan karena mampu memodelkan perilaku material secara elastis maupun plastis serta menangani kondisi kontak antar elemen (Zhu et al., 2025).

Meskipun demikian, akurasi hasil analisis FEM sangat dipengaruhi oleh kualitas pemodelan, seperti ukuran mesh, definisi material, serta kondisi batas yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang baik dalam proses pemodelan agar hasil yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi aktual struktur.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis kinerja sambungan socket pada jembatan pelengkung. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran yang detail mengenai distribusi tegangan dan deformasi pada elemen struktur dengan geometri kompleks, seperti sambungan socket.

3.1 Objek penelitian

Objek penelitian yang digunakan adalah sambungan socket pada Jembatan Duplikasi Liliba yang terletak di Kota Kupang. Jembatan ini merupakan jembatan pelengkung dengan tipe *network tied arch* yang menggunakan sistem hanger sebagai elemen tarik utama. Sambungan socket pada hanger dipilih sebagai objek kajian karena berperan penting dalam mentransfer gaya dari kabel ke struktur utama.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari gambar teknis dan data eksisting jembatan, yang meliputi dimensi geometri sambungan, konfigurasi struktur, serta parameter material yang digunakan. Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses pemodelan numerik.

3.2 Pemodelan numerik

Pemodelan sambungan socket dilakukan menggunakan perangkat lunak ABAQUS dengan pendekatan tiga dimensi (*3D modeling*). Model disusun dengan memperhatikan bentuk geometri aktual sambungan, termasuk bagian lug, badan socket, dan area kontak antara elemen.

Material yang digunakan dalam pemodelan diasumsikan sebagai baja dengan sifat elastis-plastis, sesuai dengan karakteristik material struktur jembatan pada umumnya. Parameter material seperti modulus elastisitas dan kuat leleh dimasukkan ke dalam model untuk memperoleh hasil analisis yang mendekati kondisi nyata.

Untuk meningkatkan ketelitian hasil analisis, dilakukan proses *meshing* dengan ukuran elemen yang lebih halus pada area kritis, seperti bagian lug dan sudut dalam socket. Hal ini bertujuan untuk menangkap distribusi tegangan secara lebih akurat pada daerah yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan.

3.3 Kondisi batas dan pembebanan

Dalam analisis ini, kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan sesuai dengan kondisi kerja sambungan pada struktur jembatan. Bagian tertentu dari model diasumsikan sebagai tumpuan tetap, sedangkan bagian lainnya diberikan kebebasan gerak sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Pembebanan yang digunakan adalah pembebanan statik yang merepresentasikan beban kerja jembatan, seperti beban mati dan beban hidup. Beban diberikan pada bagian lug sebagai titik masuk gaya dari kabel hanger, sehingga dapat diamati bagaimana gaya tersebut didistribusikan ke seluruh bagian sambungan socket.

Pendekatan ini digunakan untuk memahami perilaku dasar sambungan terhadap pembebanan, terutama dalam hal distribusi tegangan dan pola deformasi yang terjadi.

3.4 Tahapan analisis

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Studi literatur mengenai jembatan pelengkung dan sambungan socket
2. Pengumpulan data teknis dan geometri sambungan
3. Pembuatan model numerik menggunakan ABAQUS

4. Penentuan material, kondisi batas, dan pembebanan
5. Proses simulasi untuk memperoleh distribusi tegangan dan deformasi
6. Analisis hasil simulasi untuk memahami kinerja sambungan

Tahapan ini dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi kinerja sambungan secara representatif.

3.5 Parameter analisis

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:

- a) Tegangan (stress), khususnya tegangan maksimum untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan
- b) Deformasi (displacement), untuk melihat pola perpindahan dan kekakuan struktur
- c) Distribusi tegangan, untuk memahami alur transfer gaya dalam sambungan

Ketiga parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja sambungan socket serta mengidentifikasi potensi permasalahan yang dapat terjadi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Distribusi tegangan pada sambungan socket

Hasil analisis menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada sambungan socket tidak merata di seluruh bagian struktur. Tegangan maksimum teridentifikasi berada pada area lug serta pada sudut bagian dalam socket. Nilai tegangan maksimum yang terjadi mencapai sekitar 99 MPa, yang ditunjukkan oleh zona warna dengan intensitas tinggi pada hasil visualisasi.

Konsentrasi tegangan pada area tersebut disebabkan oleh adanya perubahan geometri yang cukup tajam, sehingga aliran gaya tidak dapat menyebar secara merata. Bagian lug berfungsi sebagai titik masuk gaya dari kabel hanger, sehingga menerima beban tarik terbesar. Selain itu, kombinasi antara gaya tarik dan efek lentur lokal menyebabkan meningkatnya tegangan pada area tersebut.

Sementara itu, bagian badan socket menunjukkan distribusi tegangan yang relatif lebih rendah dan merata. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar elemen struktur masih bekerja dalam kondisi elastis dan mampu menahan beban yang diberikan dengan baik. Pola distribusi tegangan ini menunjukkan bahwa sambungan socket secara umum mampu menyalurkan gaya dari titik pembebanan ke seluruh bagian struktur secara efektif.

Jika dibandingkan dengan kuat leleh material baja yang digunakan, nilai tegangan maksimum yang terjadi masih berada di bawah batas kapasitas material. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan socket dalam kondisi aman terhadap kegagalan akibat beban statik. Namun demikian, keberadaan konsentrasi tegangan tetap perlu diperhatikan karena berpotensi menjadi titik awal kerusakan dalam jangka panjang.

4.2 Pola deformasi pada sambungan socket

Selain tegangan, deformasi merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada bagian lug dengan nilai sekitar **0,79 mm**. Nilai deformasi ini kemudian menurun secara bertahap menuju bagian badan socket dan mendekati nol pada bagian bawah yang berfungsi sebagai tumpuan.

Pola deformasi ini menunjukkan bahwa sambungan socket memiliki kemampuan untuk mendistribusikan gaya secara bertahap dari titik masuk beban ke bagian struktur lainnya. Bagian lug yang mengalami deformasi terbesar menunjukkan bahwa elemen tersebut bekerja sebagai titik utama penerima beban.

Distribusi deformasi yang halus tanpa adanya lonjakan perpindahan yang ekstrem pada bagian lain menunjukkan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup baik. Hal ini merupakan indikasi bahwa sambungan socket tidak mengalami deformasi berlebih yang dapat menyebabkan ketidakstabilan struktur.

Namun demikian, deformasi yang relatif besar pada bagian lug tetap perlu diperhatikan, karena dapat berkontribusi terhadap peningkatan tegangan lokal dan mempercepat terjadinya kelelahan material. Oleh karena itu, desain sambungan perlu mempertimbangkan aspek kekakuan pada area tersebut.

4.3 Pemahaman kinerja sambungan socket

Berdasarkan hasil analisis tegangan dan deformasi, dapat dipahami bahwa kinerja sambungan socket dipengaruhi oleh interaksi antara bentuk geometri, lokasi pembebanan, serta distribusi gaya dalam struktur. Sambungan socket bekerja dengan cara menerima gaya dari kabel hanger pada bagian lug, kemudian menyalurkan gaya tersebut ke badan socket dan selanjutnya ke elemen struktur lainnya.

Area lug berperan sebagai titik kritis karena menerima gaya terbesar sekaligus mengalami deformasi maksimum. Oleh karena itu, bagian ini menjadi lokasi yang paling rentan terhadap konsentrasi tegangan. Sementara itu, bagian badan socket berfungsi sebagai media distribusi gaya yang relatif lebih stabil. Kinerja sambungan dapat dikatakan baik apabila mampu:

1. Menyalurkan gaya secara merata
2. Menghindari konsentrasi tegangan berlebih

3. Membatasi deformasi agar tetap dalam batas aman

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga aspek tersebut secara umum telah terpenuhi. Namun, adanya konsentrasi tegangan pada area tertentu menunjukkan bahwa masih terdapat potensi perbaikan dalam desain sambungan.

4.4 Implikasi terhadap desain sambungan

Hasil analisis memberikan beberapa implikasi penting terhadap desain sambungan socket pada jembatan pelengkung, antara lain:

- a) Perlu penghalusan geometri pada area kritis
Bagian lug dan sudut dalam socket sebaiknya dirancang dengan radius yang lebih besar untuk mengurangi konsentrasi tegangan.
- b) Penambahan elemen pengaku (stiffener)
Penambahan pengaku pada area sekitar lug dapat membantu mendistribusikan gaya secara lebih merata.
- c) Perhatian terhadap detail fabrikasi
Kualitas pengerjaan, seperti pengelasan dan finishing permukaan, sangat mempengaruhi ketahanan sambungan terhadap kelelahan.
- d) Evaluasi terhadap beban berulang
Meskipun aman terhadap beban statik, sambungan tetap perlu dievaluasi terhadap potensi beban berulang yang dapat menyebabkan kelelahan material.

Dengan mempertimbangkan aspek-aspek tersebut, kinerja sambungan socket dapat ditingkatkan sehingga mampu memberikan umur layan yang lebih panjang dan tingkat keamanan yang lebih tinggi.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis tegangan dan deformasi pada sambungan socket Jembatan Pelengkung Duplikasi Liliba, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Distribusi tegangan pada sambungan socket menunjukkan bahwa tegangan maksimum terkonsentrasi pada area lug dan sudut bagian dalam socket, dengan nilai mencapai sekitar 99 MPa. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan geometri yang menyebabkan aliran gaya tidak merata.
- b) Deformasi maksimum terjadi pada bagian lug sebesar sekitar 0,79 mm, kemudian menurun secara bertahap menuju badan socket. Pola ini menunjukkan bahwa sambungan mampu menyalurkan gaya secara bertahap dari titik pembebanan ke seluruh elemen struktur.
- c) Secara umum, sambungan socket berada dalam kondisi aman terhadap beban statik karena nilai tegangan yang terjadi masih berada di bawah kapasitas material. Namun demikian, adanya konsentrasi tegangan pada area tertentu menunjukkan potensi terjadinya kelelahan material dalam jangka panjang.
- d) Kinerja sambungan socket dipengaruhi oleh geometri sambungan, lokasi pembebanan, dan distribusi gaya dalam struktur. Oleh karena itu, perbaikan desain seperti penghalusan geometri dan penambahan elemen pengaku dapat meningkatkan kinerja dan umur layan sambungan.

Dengan demikian, pemahaman terhadap perilaku tegangan dan deformasi pada sambungan socket sangat penting dalam mendukung perencanaan dan evaluasi struktur jembatan pelengkung yang lebih aman dan andal.

DAFTAR PUSTAKA

Zhou, X., Nie, X., dan Ding, R. (2024). "Experimental and analytical studies on interfacial shear behavior of socket connections with shear keys". *Journal of Building Engineering*.

Su, S., et al. (2024). "Bond-slip behavior of UHPC-filled CFST bridge column-beam socket connection: Experimental study and analytical model". *Structures*.

Zhu, Z., Zhang, G., Han, Q., Li, Z., Xu, L., dan Du, X. (2025). "Nonlinear hysteretic model of prefabricated pier-cap beam joint with CFST socket connection". *Engineering Structures*.

McCombs, N., Hurt, M., dan Konda, T. (2023). "The Amelia Earhart network tied arch bridge replacement project". *Bridge Engineering*.

Chen, W. F., dan Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press.

AASHTO. (2020). *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Baja Struktural. Jakarta.

PERFORMANCE OF SOCKET CONNECTIONS IN ARCH BRIDGES: A CASE STUDY OF LILIBA BRIDGE

Vega Aditama¹, Krisna Febrian Anugerahputra², Hadi Surya Wibawanto³, dan Mohammad Erfan⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

⁴Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-Gura No 02 Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

ABSTRACT

Socket connections play a crucial role in arch bridge structures, particularly in *network tied arch* systems, where they serve as the primary medium for transferring tensile forces from hanger cables to the main structural components. The reliability of these connections directly influences the overall structural performance and safety of the bridge.

This study investigates the structural behavior of socket connections in the Liliba Duplication Arch Bridge, Kupang, through an evaluation of stress distribution and deformation characteristics. A numerical approach based on the Finite Element Method (FEM) was implemented using ABAQUS software under static loading conditions representing actual service scenarios.

The analysis reveals that peak stress values are localized in regions where load transfer occurs, reaching approximately 99 MPa. In terms of deformation, the highest displacement is observed at the load-entry region, with a value close to 0.79 mm, and gradually diminishes toward the socket body. These findings indicate that the connection effectively channels the applied load through the structural system.

Although the stress levels remain within allowable limits, localized stress intensification suggests potential vulnerability to fatigue over time. Therefore, improvements in geometric detailing are recommended to enhance long-term structural performance.

Keywords: socket connection, arch bridge, stress, deformation, case study

1. INTRODUCTION

Bridge infrastructure plays a vital role in improving regional connectivity and supporting economic growth, especially in developing areas such as Kupang City. Bridges not only serve as transportation facilities but also as strategic infrastructure that must be designed with high levels of safety and reliability. One of the commonly used bridge types for long spans is the arch bridge, which is known for its efficiency in distributing loads through compressive force mechanisms toward the supports.

In modern applications, the *network tied arch* system is widely adopted due to its structural efficiency and stability. This system consists of main components such as the arch rib, tie girder, and hanger elements that work together to transfer loads. The hanger functions as a tensile element connecting the bridge deck to the arch structure. In this system, the connection between the hanger and the main structural elements is typically achieved using socket connections.

Socket connections play a crucial role in transferring tensile forces from the hanger cables to the main structure. Therefore, their performance significantly influences the overall stability and safety of the bridge. However, socket connections are often considered critical points in the structure due to the presence of stress concentration, particularly in areas with geometric discontinuities such as the lug and transition regions.

These geometric irregularities can lead to uneven stress distribution, resulting in high local stresses. Over time, such conditions may cause structural damage, especially due to material fatigue under repeated loading conditions (Zhou et al., 2024; Su et al., 2024).

With advancements in structural analysis, the Finite Element Method (FEM) has become a widely used approach for evaluating complex structural behavior. FEM enables detailed analysis of stress distribution and deformation in components with complex geometries, such as socket connections. Software such as ABAQUS allows accurate modeling of structural behavior under various loading conditions (Zhu et al., 2025).

Despite numerous studies on socket connections, most research focuses on complex technical analysis and provides limited insight into the overall structural performance in a more understandable and practical manner.

Furthermore, studies based on actual bridge conditions in Indonesia, particularly for *network tied arch* bridges, remain limited. Local environmental factors such as tropical climate, high humidity, and traffic load variations may significantly influence connection performance over time.

Therefore, this study aims to provide a clearer understanding of socket connection performance in arch bridges through stress and deformation analysis. The Liliba Duplication Arch Bridge in Kupang is selected as the case study. The analysis is conducted using a FEM-based numerical approach to identify stress distribution, critical stress zones, and deformation patterns.

The findings of this study are expected to contribute to better design understanding and provide practical insights for improving the performance and durability of socket connections in arch bridge structures.

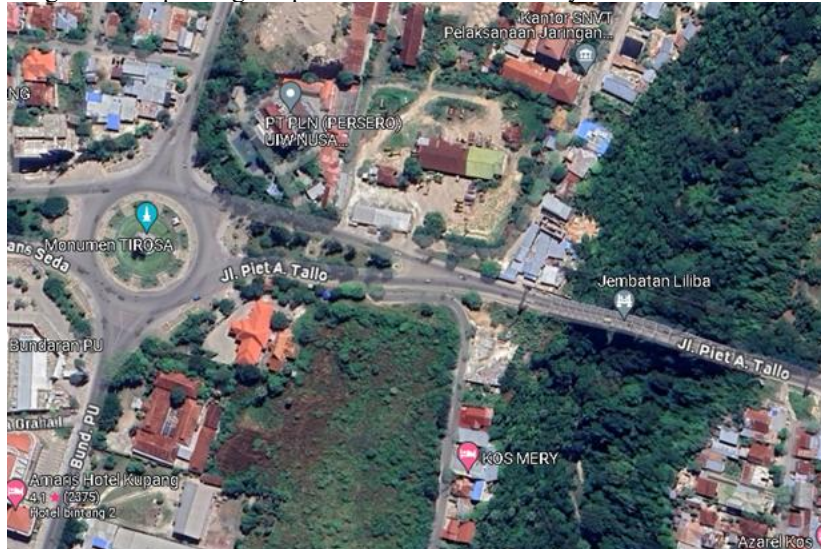


Figure 1. Location of the Liliba Duplication Arch Bridge

2. LITERATURE REVIEW

Arch bridge system

Arch bridges are widely used due to their ability to efficiently transfer loads through compressive forces. The load applied to the structure is distributed along the arch and transferred to the supports, reducing bending moments compared to conventional beam systems. The *network tied arch* system improves structural performance by using diagonal hangers arranged in a crossed pattern. This configuration results in better load distribution, reduced deformation, and improved resistance to dynamic loads such as traffic and wind.

Socket connections in bridge structures

Connections are essential components in steel structures, enabling different elements to work as a unified system. In arch bridges, socket connections are used to connect hanger cables to the main structural elements and transfer tensile forces. However, due to their complex geometry, socket connections often experience stress concentration, especially in critical areas such as the lug and inner corners. These regions are more susceptible to structural damage. Previous studies indicate that connection performance is influenced by geometry, material properties, and loading conditions (Zhou et al., 2024).

Stress and deformation behavior

Stress and deformation are key parameters in evaluating structural performance. Uneven stress distribution can lead to stress concentration, while excessive deformation may indicate structural instability. In socket connections, maximum stress typically occurs in transition regions, while maximum deformation occurs at load application points. Understanding these behaviors is essential for improving design performance.

Finite Element Method (FEM)

The Finite Element Method (FEM) is a numerical approach used to analyze complex structures by dividing them into smaller elements. This method enables detailed evaluation of stress and deformation distribution. Software such as ABAQUS is widely used due to its ability to simulate material behavior and handle complex contact interactions. However, the accuracy of FEM results depends on proper modeling, including mesh quality, material definition, and boundary conditions.

3. RESEARCH METHOD

This study employs a numerical approach based on the Finite Element Method (FEM) to analyze the performance of socket connections in arch bridge structures. The FEM approach is selected due to its capability to provide detailed insights into stress distribution and deformation in structural elements with complex geometries, such as socket connections.

3.1 Research object

The research object is the socket connection of the Liliba Duplication Arch Bridge located in Kupang City. This bridge is categorized as a *network tied arch* system, where hanger elements function as the primary tensile components. The socket connection at the hanger is selected as the focus of this study due to its critical role in transferring forces from the cable to the main structural system. The data used in this study are obtained from technical drawings and existing bridge data, including geometric dimensions, structural configuration, and material properties. These data serve as the basis for developing the numerical model.



Figure 2. Liliba Duplication Arch Bridge

3.2 Numerical modeling

The socket connection is modeled using ABAQUS software with a three-dimensional (3D) approach. The model is constructed to represent the actual geometry of the connection, including the lug, socket body, and contact regions between components. The material is assumed to be structural steel with elastic-plastic behavior, representing typical bridge construction materials. Material parameters such as modulus of elasticity and yield strength are defined to simulate realistic structural behavior. To improve analysis accuracy, a finer mesh is applied in critical areas, particularly around the lug and inner corners of the socket. This approach ensures a more precise representation of stress concentration zones.

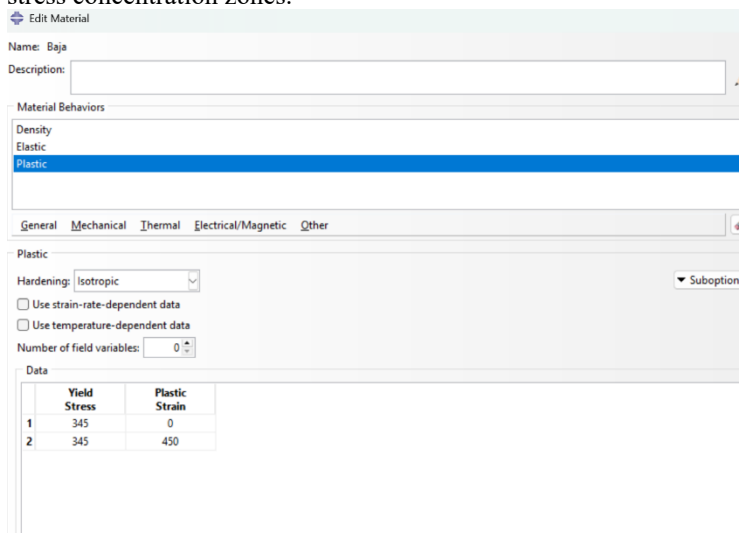


Figure 3. ABAQUS app

3.3 Boundary conditions and loading

Boundary conditions are defined to represent the actual working condition of the socket connection within the bridge structure. Certain parts of the model are constrained as fixed supports, while others are allowed limited movement according to realistic structural behavior. The applied loading is static loading representing service loads, including dead load and live load. The load is applied at the lug, which acts as the primary load transfer point from the hanger cable. This setup allows observation of how forces are distributed throughout the socket connection.

3.4 Analysis procedure

The research is conducted through the following steps:

1. Literature review on arch bridges and socket connections
2. Collection of geometric and technical data
3. Development of a numerical model using ABAQUS
4. Definition of material properties, boundary conditions, and loading
5. Simulation to obtain stress and deformation results
6. Analysis and interpretation of simulation results

These steps ensure that the analysis accurately represents the structural behavior of the socket connection.

3.5 Analysis parameters

The main parameters analyzed in this study include:

- a) Stress, particularly maximum stress to identify stress concentration zones
- b) Deformation (displacement), to evaluate structural stiffness and movement patterns
- c) Stress distribution, to understand load transfer mechanisms within the connection

These parameters are used to assess the performance of the socket connection and identify potential structural issues.

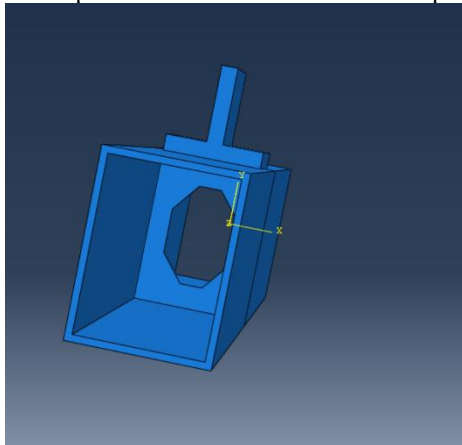


Figure 4. Assembly Process with ABAQUS App

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Stress distribution in the socket connection (SAFE VERSION)

The numerical simulation results reveal that stress is unevenly distributed throughout the socket connection. The highest stress values are primarily observed around the region where the load is introduced into the connection, particularly near the lug geometry and adjacent transition zones. The peak stress reaches approximately 99 MPa.

This behavior is closely related to the geometric configuration of the connection. Areas with abrupt changes in shape tend to disrupt the smooth flow of internal forces, leading to localized stress intensification. The lug, acting as the primary load transfer interface, naturally experiences higher stress levels compared to other regions.

On the other hand, the main body of the socket exhibits relatively stable stress levels with a more uniform distribution. This indicates that the majority of the structure remains within the elastic range and contributes effectively to load transfer.

Although the observed stress level is still within the allowable limit of the material, localized stress intensification suggests that certain regions may require additional design attention, especially when considering long-term performance.

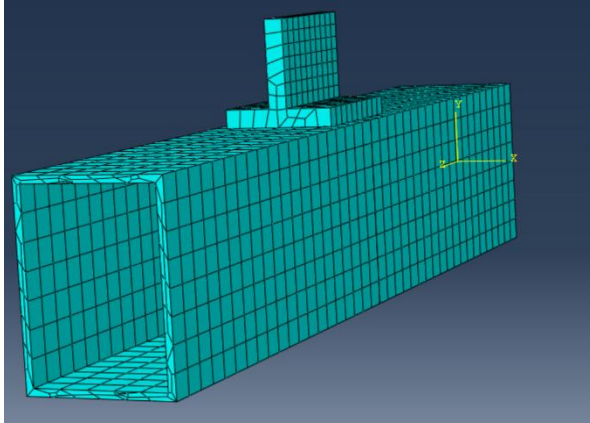


Figure 5. Meshing process

4.2 Deformation behavior (SAFE VERSION)

The deformation pattern provides further insight into the structural response of the socket connection. The highest displacement is observed at the region where the load is applied, with a magnitude of approximately 0.79 mm. The deformation gradually reduces along the structure, reaching minimal values at the restrained base.

This gradual transition in displacement indicates that the structure is capable of distributing forces smoothly without sudden stiffness changes. Such behavior reflects a stable structural response and sufficient rigidity in the socket body.

However, the relatively higher deformation at the load-entry region highlights the importance of considering local stiffness in design. If not properly addressed, this condition may contribute to increased stress concentration and long-term fatigue effects.

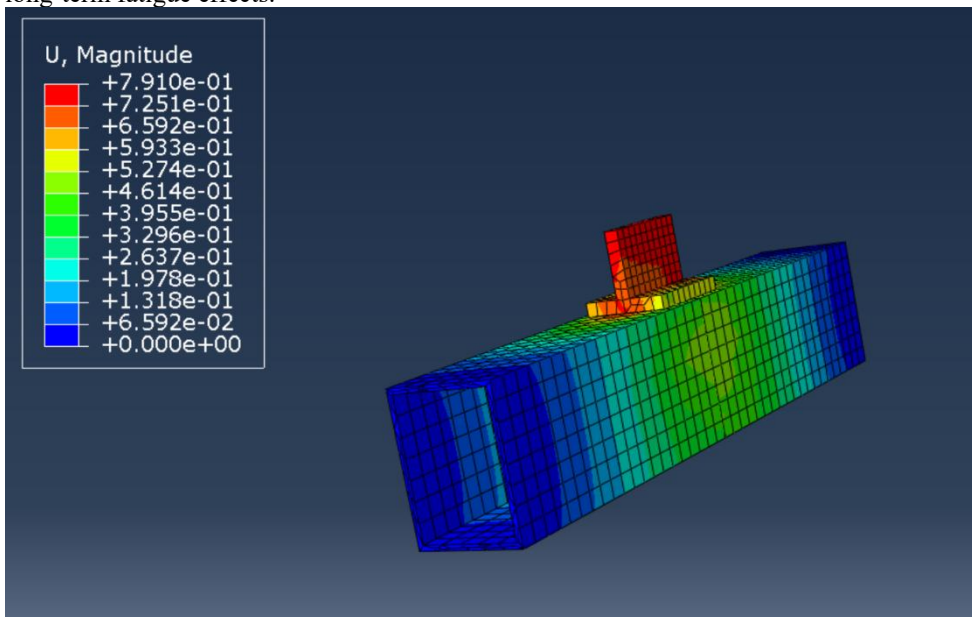


Figure 6. Deformation analysis of the Socket Connection

4.3 Interpretation of socket connection performance

Based on the stress and deformation analysis, the performance of the socket connection can be understood through the interaction between geometry, loading conditions, and load transfer mechanisms.

The socket connection functions by receiving tensile forces from the hanger cable at the lug and distributing them through the socket body to the main structure. The lug region serves as the most critical zone due to its role as the primary load entry point and its exposure to maximum stress and deformation.

A well-performing socket connection should:

1. Distribute loads efficiently throughout the structure
2. Minimize stress concentration in critical regions
3. Maintain deformation within acceptable limits

The results of this study indicate that the connection generally satisfies these conditions. However, localized stress concentration still exists, suggesting that there is room for design improvement.

4.4 Design implications

The findings of this study provide several important implications for the design of socket connections in arch bridges:

- a) Geometric refinement is necessary
Critical regions such as the lug and inner corners should be designed with smoother transitions or larger radii to reduce stress concentration.
- b) Addition of stiffening elements
Introducing stiffeners around the lug area can help distribute forces more evenly and reduce local stress intensity.
- c) Attention to fabrication quality
Proper welding, finishing, and surface treatment are essential to prevent early fatigue failure.
- d) Consideration of fatigue loading
Although the connection is safe under static loading, repeated traffic loads may lead to fatigue damage, which should be evaluated in future studies.

By addressing these aspects, the performance and durability of socket connections can be significantly improved.

5. CONCLUSION

Socket connections play a vital role in arch bridge structures, particularly in *network tied arch* systems, where they function as the primary mechanism for transferring tensile forces from hanger cables to the main structural components. The performance of these connections directly affects the overall safety and reliability of the bridge.

This study examines the structural behavior of socket connections in the Liliba Duplication Arch Bridge, Kupang, by evaluating stress distribution and deformation characteristics. A numerical approach based on the Finite Element Method (FEM) was employed using ABAQUS software under static loading conditions representing actual service scenarios.

The results indicate that peak stress values are concentrated in regions associated with load transfer, reaching approximately 99 MPa. In terms of deformation, the maximum displacement occurs near the load-entry region, with a value of about 0.79 mm, and gradually decreases toward the socket body. This behavior suggests that the connection is capable of distributing loads effectively throughout the structural system.

Although the stress levels remain within allowable limits, localized stress concentration may lead to potential fatigue issues over time. Therefore, attention to geometric detailing is necessary to improve long-term structural performance.

REFERENCES

- Zhou, X., Nie, X., dan Ding, R. (2024). "Experimental and analytical studies on interfacial shear behavior of socket connections with shear keys". *Journal of Building Engineering*.
- Su, S., et al. (2024). "Bond-slip behavior of UHPC-filled CFST bridge column-beam socket connection: Experimental study and analytical model". *Structures*.
- Zhu, Z., Zhang, G., Han, Q., Li, Z., Xu, L., dan Du, X. (2025). "Nonlinear hysteretic model of prefabricated pier-cap beam joint with CFST socket connection". *Engineering Structures*.
- McCombs, N., Hurt, M., dan Konda, T. (2023). "The Amelia Earhart network tied arch bridge replacement project". *Bridge Engineering*.
- Chen, W. F., dan Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook*. CRC Press.

AASHTO. (2020). LRFD Bridge Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk Bangunan Baja Struktural. Jakarta.