



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

ANALISIS MODIFIKASI *TIE ROD* pada *JIB CRANE* untuk MENINGKATKAN KAPASITAS ANGKAT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Muhammad Al Hazman¹⁾, Siti Rahayuningsih²⁾, Alwi Sina Khaqiqi³⁾, Syafril Mayu Dinata⁴⁾

^{1,2,3,4} Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 6011

Corresponding Author: al.hazman@ppns.ac.id

Article Info

Abstract

Keywords:

Jib Crane; Tie rod; Finite element method (FEM); Von Mises Stress; Deformation; Safety factor; Lifting Capacity.

Article history:

Received: 10/06/2026
Last revised: 17/06/2026
Accepted: 18/06/2026
Available online: 23/06/2026
Published: 23/06/2026

DOI: <https://10.35314/qctfw865>

Abstrak

Jib crane merupakan salah satu jenis pesawat angkat yang banyak digunakan dalam kegiatan industri karena memiliki konstruksi sederhana, fleksibilitas operasional yang tinggi, serta mampu menangani perpindahan beban pada area kerja terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons struktural desain awal *jib crane* dan mengevaluasi pengaruh penambahan *Tie rod* terhadap peningkatan kapasitas angkat menggunakan metode elemen hingga (*Finite element Method/FEM*). Analisis dilakukan pada dua konfigurasi, yaitu desain awal tanpa *Tie rod* dan desain modifikasi dengan penambahan *tie rod*. Simulasi numerik dilakukan menggunakan Fusion 360 dengan material ASTM A36 dan pembebanan statis pada beberapa variasi beban. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan von Mises, deformasi total, dan faktor keamanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain awal masih aman pada beban 750 kg dengan tegangan maksimum 96,11 MPa, deformasi 1,582 mm, dan faktor keamanan 2,58. Namun, pada beban 1.000 kg tegangan meningkat hingga 286,40 MPa sehingga melampaui tegangan luluh material dan menyebabkan faktor keamanan turun menjadi 0,87. Penambahan *Tie rod* menghasilkan peningkatan kinerja struktural yang signifikan. Pada beban 750 kg, tegangan maksimum turun menjadi 30,70 MPa, deformasi berkurang menjadi 1,115 mm, dan faktor keamanan meningkat menjadi 8,10. Bahkan pada beban 1.500 kg, struktur modifikasi masih menunjukkan tegangan maksimum sebesar 61,32 MPa dengan faktor keamanan sekitar 4. Hasil penelitian membuktikan bahwa penambahan *Tie rod* mampu mengurangi momen lentur pada *boom*, meningkatkan kekakuan struktur, serta memperbesar kapasitas angkat secara aman. Dengan demikian, modifikasi *Tie rod* layak diterapkan sebagai solusi rekayasa untuk meningkatkan performa dan keselamatan *jib crane* pada aplikasi industri.

Abstract

Jib cranes are widely used lifting devices in industrial operations due to their simple construction, high operational flexibility, and ability to handle material transfer within limited working areas. This study aims to analyze the structural response of an original *jib crane* design and evaluate the effect of adding a *Tie rod* on lifting capacity improvement using the *Finite element method (FEM)*. The analysis was conducted on two configurations: the original design without a *Tie rod* and a modified design with an additional *tie rod*. Numerical simulations were performed using Fusion 360 with ASTM A36 steel material under several static loading conditions. The analyzed parameters included von Mises stress, total deformation, and *safety factor*. The simulation results showed that the original design remained safe under a load of 750 kg, with a maximum stress of 96.11 MPa, a deformation of 1.582 mm, and a *safety factor* of 2.58. However, when the load was increased to 1,000 kg, the maximum stress rose to 286.40 MPa, exceeding the material *yield strength* and reducing the *safety factor* to 0.87, indicating an unsafe condition. The addition of a *Tie rod* significantly improved the structural performance. Under a 750 kg load, the maximum stress decreased to 30.70 MPa, deformation was reduced to 1.115 mm, and the *safety factor* increased to 8.10. Furthermore, under a 1,500 kg load, the modified structure still exhibited a maximum stress of only 61.32 MPa with a *safety factor* of approximately 4. The results demonstrate that the *Tie rod* effectively reduces the bending moment acting on the *boom*, enhances structural stiffness, and safely increases the lifting capacity. Therefore, the *Tie rod* modification can be considered an effective engineering solution for improving the performance and safety of *jib cranes* in industrial applications.

1. PENDAHULUAN

Kegiatan perawatan *deep well* merupakan proses penting dalam menjaga kontinuitas suplai air pada fasilitas industri. Pada banyak kasus, proses pengangkatan dan penurunan pipa *deep well* masih dilakukan secara manual atau menggunakan peralatan sederhana seperti katrol yang dipasang pada *scaffolding*. Metode tersebut memerlukan banyak tenaga kerja, waktu yang lama, serta memiliki tingkat risiko yang cukup tinggi bagi operator. Kondisi ini mendorong kebutuhan akan penggunaan alat angkat (*lifting equipment*) yang lebih aman, efisien, dan sesuai dengan prinsip dasar rekayasa [1], [9], [10]. Pada penelitian rujukan sebelumnya, telah dirancang sebuah jib *crane* dengan kapasitas angkat 500 kg yang terbukti aman berdasarkan hasil analisis tegangan dan lendutan. Penelitian tersebut menyatakan bahwa struktur berbahan ASTM A36 yang dianalisis memiliki tegangan maksimum sebesar 45,947 MPa, yang masih berada jauh di bawah nilai *yield strength* 250 MPa sehingga dikategorikan aman untuk digunakan. Seperti yang dijelaskan dalam referensi tersebut, “jib *crane* memiliki nilai maksimal stress sebesar 45,947 MPa lebih kecil dari nilai *yield strength* yaitu 250 MPa” [2]. Temuan ini menjadi dasar bahwa rancangan awal mempunyai performa yang memadai untuk kapasitas standar. Namun demikian, kebutuhan lapangan sering kali memerlukan alat angkat dengan kapasitas yang lebih besar atau struktur yang lebih kaku untuk mengurangi lendutan dan momen yang terjadi pada lengan jib *crane*[3]. Oleh sebab itu, kelompok ini melakukan pengembangan berupa penambahan komponen *Tie rod* pada lengan, dengan tujuan memperbaiki distribusi beban dan mengurangi momen lentur[18]. Modifikasi ini diharapkan mampu meningkatkan kapasitas angkat serta memberikan peningkatan faktor keselamatan dibandingkan desain awal yang menjadi acuan. Dengan dilakukannya analisis menggunakan metode *finite element method* (FEM), penelitian ini berusaha membandingkan performa desain asli dan desain modifikasi, sekaligus menilai kelayakan modifikasi tersebut untuk diimplementasikan pada sistem pesawat angkat yang relevan dengan kebutuhan industri [19].

2. METODE

2.1 Analisis Desain

Penelitian dimulai dengan menelaah desain awal jib *crane* yang terdapat pada file yang telah dipilih. Pada tahap ini, seluruh komponen seperti *boom*, pilar, *rib plate*, *flange*, baut sambungan, base *plate*, dan *slewing mechanism* dianalisis untuk memahami struktur eksisting[11]. Parameter struktur seperti dimensi profil, material, panjang *boom*, tinggi pilar, dan titik-titik sambungan diidentifikasi sebagai input utama simulasi[12]. Tahapan identifikasi geometri, material, tumpuan, dan pembebanan perlu dilakukan secara konsisten karena sangat menentukan akurasi hasil analisis struktur baja dan simulasi elemen hingga [15].

2.2 Pembuatan Model 3D Jib Crane

Menyusun Model tiga dimensi dibuat menggunakan Fusion 360 berdasarkan data. Semua komponen dimodelkan secara presisi dengan memperhatikan ketebalan pelat, kondisi sambungan, dan proporsi geometri. Pemodelan dilakukan dalam dua versi [4]:

1. Desain awal (tanpa *tie rod*)

Desain awal *jib crane* dibuat dengan mengikuti dimensi dan material yang tercantum pada literatur serta acuan tugas. Pada tahap ini, seluruh komponen utama seperti *boom*, pilar, *rib plate*, *flange*, dan sambungan baut dimodelkan sesuai konfigurasi dasar yang digunakan dalam referensi

teknis. Tujuan dari pembuatan desain awal adalah memperoleh representasi struktur yang dapat menjadi acuan perbandingan sebelum dilakukan modifikasi.

Analisis terhadap desain awal difokuskan pada parameter struktural yang meliputi tegangan, perpindahan atau deformasi, dan faktor keamanan. Melalui simulasi *finite element method* (FEM) pada Fusion 360, perilaku struktur dievaluasi untuk melihat seberapa besar momen lentur dan deformasi yang terjadi pada *boom* tanpa adanya elemen tambahan. Hasil evaluasi desain awal ini menjadi dasar untuk menentukan apakah struktur masih dapat ditingkatkan performanya atau memerlukan penambahan komponen untuk meningkatkan kekakuan dan kestabilan [20].

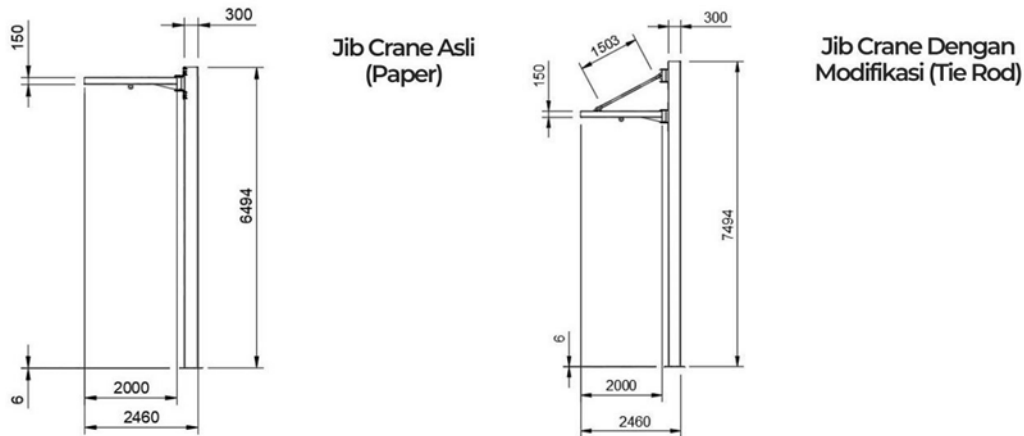
2. Desain modifikasi (dengan *tie rod*).

Desain modifikasi dilakukan dengan menambahkan komponen *Tie rod* pada bagian atas *boom*. Komponen ini dipasang secara diagonal menghubungkan *boom* dengan pilar sehingga membentuk struktur yang lebih kaku. Tujuan penambahan *Tie rod* adalah mengurangi momen lentur pada *boom*, menurunkan deformasi, serta meningkatkan kestabilan selama proses pengangkatan beban [11], [12]. Secara mekanis, penambahan *Tie rod* mengubah distribusi beban dari yang sebelumnya hanya ditanggung oleh *boom* menjadi terbagi antara *boom* dan elemen tarik tersebut. *Tie rod* bekerja menahan beban melalui gaya tarik sehingga struktur keseluruhan menjadi lebih stabil dan deformasi berkurang [13]. Dengan demikian, modifikasi ini diharapkan dapat meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi tegangan maksimum pada titik kritis [17].

Simulasi FEM kembali dilakukan untuk menilai perubahan perilaku struktur setelah penambahan *tie rod*. Perbandingan antara desain awal dan desain modifikasi dilakukan dengan melihat perubahan nilai tegangan, deformasi, dan tingkat kekakuan struktur [18]. Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan efektivitas modifikasi dan melihat sejauh mana *Tie rod* mampu meningkatkan kinerja jib *crane* [19].

2.3 Geometri dan Material

Model jib *crane* yang dianalisis pada penelitian ini terdiri atas dua konfigurasi utama, yaitu desain awal tanpa *Tie rod* dan desain modifikasi dengan penambahan *Tie rod* serta peninggian pilar sebesar 1.000 mm. Kedua desain memiliki karakteristik geometri yang sama pada bagian *boom*, pilar, dan pelat penguat, sehingga perbedaan perilaku struktural dapat ditelusuri langsung dari perubahan sistem penahan gaya yang dihasilkan oleh *tie rod*. Geometri pemodelan dibuat mengikuti ukuran nyata yang digunakan, yaitu panjang *boom* sebesar 2.000 mm, tinggi pilar awal sebesar 6.494 mm, serta tinggi pilar modifikasi sebesar 7.494 mm. Dimensi ini mencerminkan kondisi *crane* dengan bentang pendek yang bekerja sebagai alat bantu pemindahan material [14].



Gambar 1. Perbandingan Dimensi Jib Crane Awal dengan Dimensi Jib Crane telah Modifikasi Tie rod

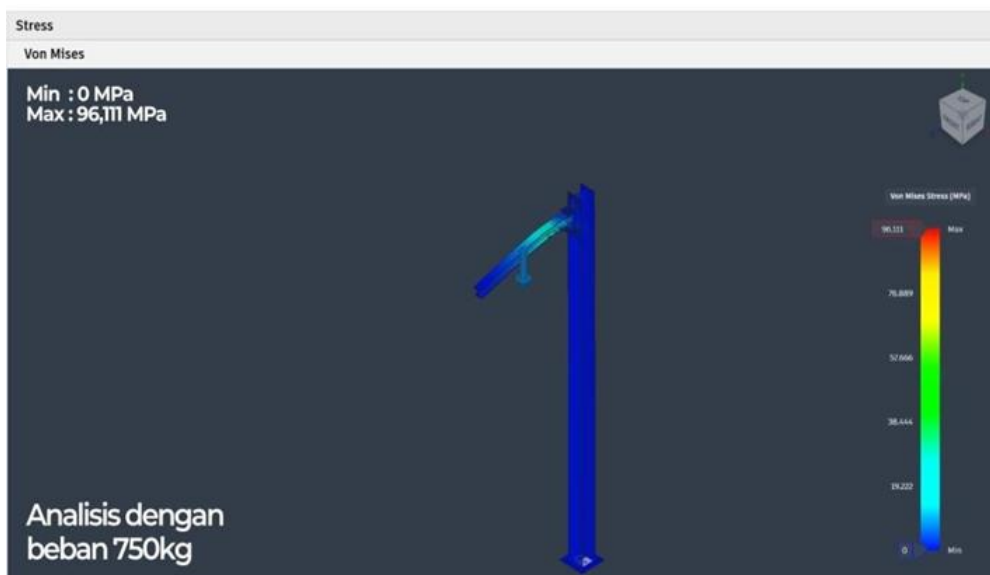
Material yang digunakan pada seluruh elemen utama adalah baja ASTM A36, yang memiliki modulus elastisitas sekitar 200 GPa, rasio Poisson 0,3, serta tegangan luluh sekitar 250 MPa. Material ini dipilih karena mudah difabrikasi, memiliki sifat mekanik yang stabil, dan banyak digunakan pada konstruksi baja industri [7]. Beberapa pelat penguat menggunakan baja S45C sesuai referensi acuan, terutama pada bagian yang membutuhkan kekuatan lebih tinggi. Penggunaan material yang sama pada kedua desain memastikan bahwa perubahan respons struktural hanya berasal dari perbedaan geometri dan bukan dari variasi sifat material [8].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Desain Awal dan Simulasi beban 750 Kg

Simulasi metode elemen hingga dilakukan untuk empat kondisi pembebanan pada dua konfigurasi struktur. Setiap simulasi menghasilkan tiga jenis keluaran utama, yaitu distribusi tegangan von Mises, *displacement*, dan nilai faktor keamanan (*safety factor*). Ketiga hasil ini wajib dicantumkan untuk memberikan gambaran lengkap mengenai perilaku elastis struktur dan batas keamanan desain [20].

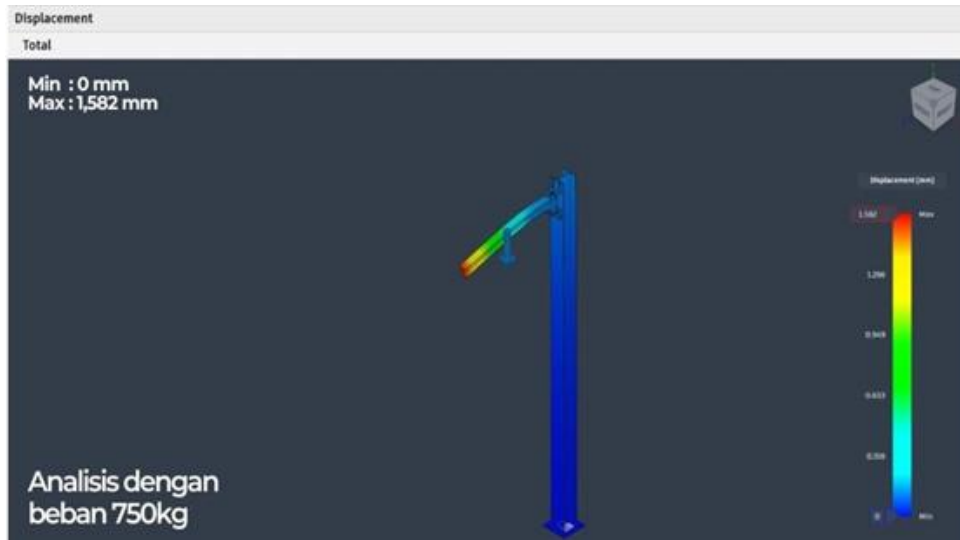
a. Stress



Gambar 2. Hasil Simulasi Displacement pada beban 750 kg

Gambar 2 tegangan menunjukkan bahwa tegangan puncak muncul di daerah sambungan *boom*–*pilar*, terutama pada sisi atas *flange boom* yang menerima momen lentur terbesar. Nilai tegangan maksimum sekitar 96,11 MPa, masih jauh di bawah tegangan luluh ASTM A36. Warna kontur yang didominasi zona hijau biru menandakan bahwa distribusi tegangan relatif stabil dan tidak terdapat konsentrasi ekstrem selain pada titik sambungan. Hal ini menunjukkan bahwa untuk beban 750 kg, struktur desain awal masih bekerja pada wilayah elastis dengan margin yang cukup aman. [7], [8].

b. Displacement



Gambar 3. Analisis Safety factor

Deformasi maksimum sebesar 1,582 mm, dengan pola lenturan yang khas pada struktur kantilever. *Boom* mengalami lendutan ke bawah secara merata, sementara pilar tetap relatif kaku. Pola ini menandakan bahwa mekanisme deformasi didominasi oleh kelenturan *boom* dan bukan instabilitas pilar. Deformasi masih tergolong kecil dan tidak menimbulkan masalah operasional untuk beban ringan.

a. Safety factor



Gambar 4. Analisis Deformasi

Nilai *safety factor* minimum berkisar 2,6–3, menunjukkan bahwa struktur memiliki cadangan kekuatan yang cukup untuk menahan beban 750 kg. Area dengan faktor keamanan terendah tetap berada di sambungan *boom*–pilar, sesuai lokasi tegangan tertinggi. Kondisi ini wajar dan dapat diterima, menunjukkan bahwa desain awal masih layak untuk beban ini.

3.2 Desain Awal – Beban 1000 kg

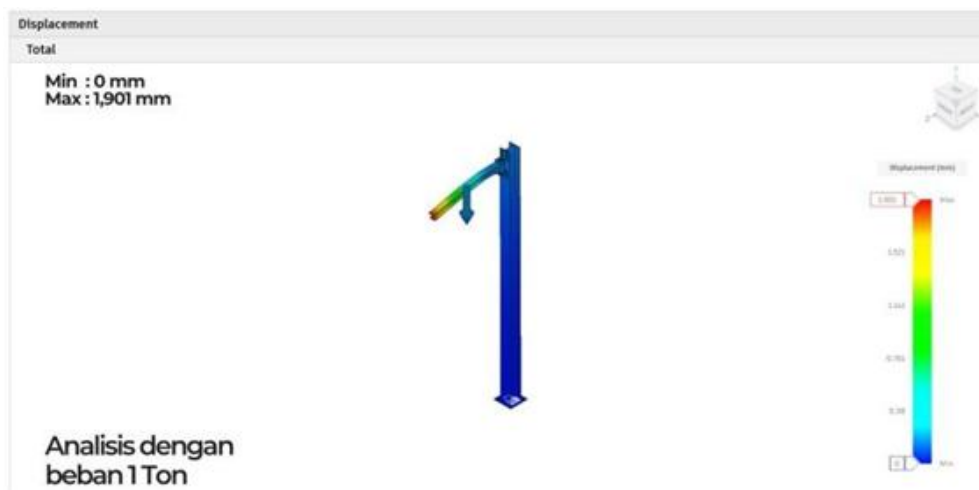
a. Stress



Gambar 5. Hasil Simulasi Stress pada beban 1000 kg

Ketika *beban* dinaikkan menjadi 1.000 kg, tegangan meningkat secara signifikan. Nilai puncak mencapai 286,40 MPa, melampaui tegangan luluh ASTM A36. Kontur warna menunjukkan area merah pekat pada sambungan *boom*–pilar, menandakan bahwa material mulai memasuki fase plastis. Hal ini menunjukkan bahwa desain awal tidak aman untuk beban 1.000 kg dan berpotensi mengalami deformasi permanen atau kegagalan structural. [7], [8].

b. Displacement



Gambar 6. Hasil Simulasi Displacement pada beban 1000 kg

Deformasi maksimum sekitar 1,901 mm, sedikit lebih tinggi dibanding beban 750 kg. Walau kenaikan defleksi tidak ekstrem, pola deformasi menunjukkan peningkatan rotasi lokal di sambungan.

Hal ini sesuai dengan peningkatan tegangan dan berkurangnya kekakuan lokal akibat mendekatinya batas elastis material.

c. *Safety factor*

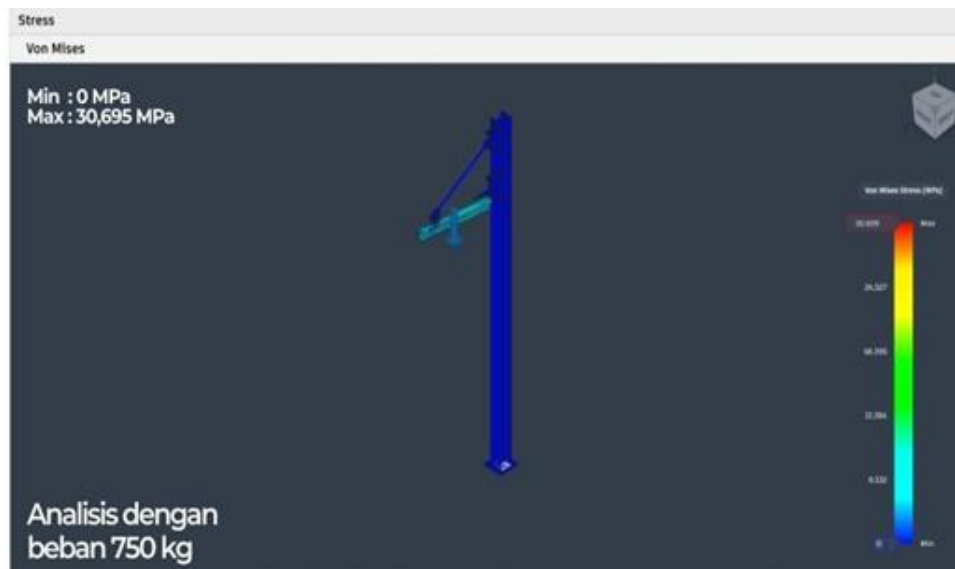


Gambar 7. Hasil Simulasi *Safety factor* pada beban 1000 kg

Nilai *safety factor* minimum berkisar 0.8–2.6, menunjukkan bahwa struktur memiliki cadangan kekuatan yang cukup untuk menahan beban 1000 kg. Area dengan faktor keamanan terendah tetap berada di sambungan *boom*–pilar, sesuai lokasi tegangan tertinggi. Kondisi ini wajar dan dapat diterima, menunjukkan bahwa desain awal masih layak untuk beban ini.

3.3 Desain Modifikasi *Tie rod* – Beban 750 kg

a. *Stress*

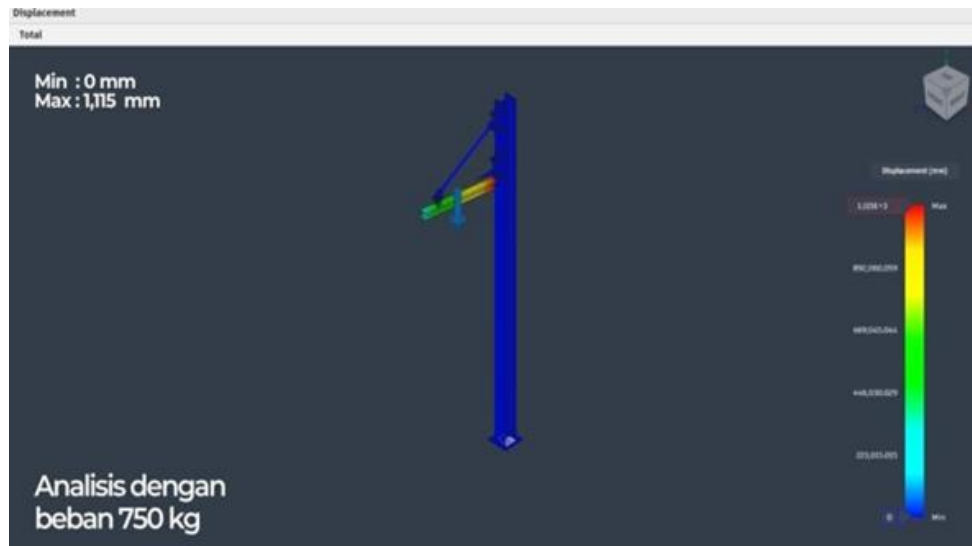


Gambar 8. Hasil Simulasi Stress pada beban 750 kg

Penambahan *Tie rod* menghasilkan redistribusi momen yang sangat signifikan. Tegangan maksimum hanya 30,70 MPa, jauh lebih rendah dibanding desain awal. *Tie rod* bekerja mengambil

sebagian besar momen, sehingga *boom* tidak lagi menanggung beban lentur sebesar sebelumnya. Warna kontur hampir seluruhnya biru-hijau, menunjukkan tegangan sangat rendah dan struktur berada dalam kondisi sangat aman [5].

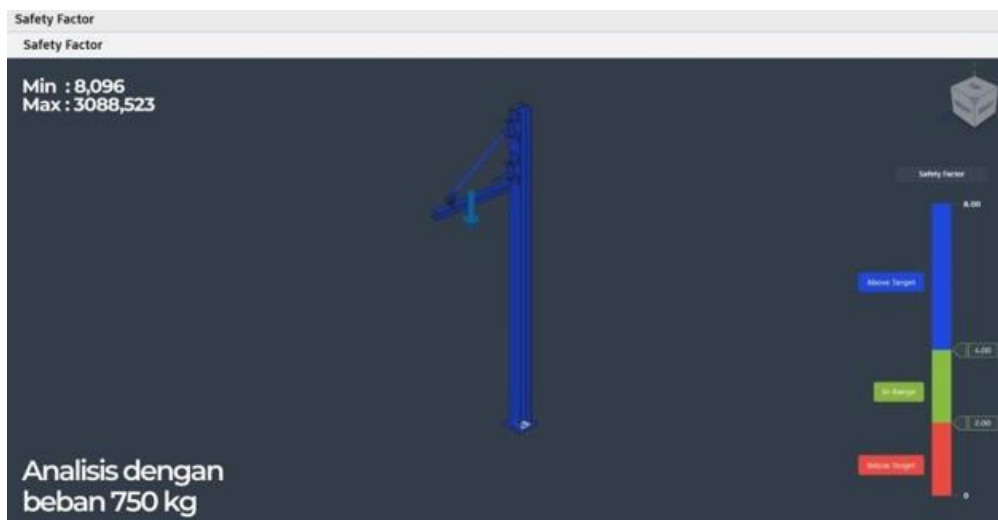
b. *Displacement*



Gambar 9. Hasil Simulasi *Displacement* pada beban 750 kg

Deformasi berkurang menjadi 1,115 mm, menunjukkan peningkatan kekakuan global. *Tie rod* memperpendek panjang efektif *boom* dan mengurangi rotasi di sambungan. Pola deformasi lebih “halus” dan seragam dibanding desain awal, memperlihatkan bahwa kontribusi elemen tarik efektif dalam memperkuat struktur.

c. *Safety factor*

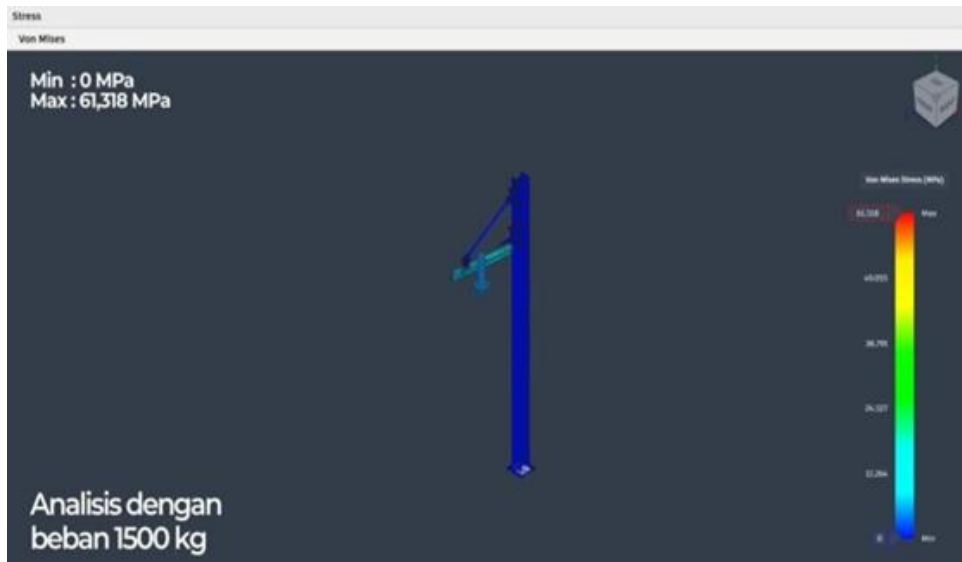


Gambar 10. Hasil Simulasi *Safety factor* pada beban 750 kg

Faktor keamanan meningkat drastis hingga 8,1, menunjukkan kapasitas cadangan kekuatan yang sangat besar. Nilai ini membuktikan bahwa untuk beban 750 kg, desain modifikasi berada jauh di bawah batas kemampuan material. Hal ini mendukung hipotesis bahwa penambahan *Tie rod* sangat efektif dalam meningkatkan performa struktural.

3.4 Desain Modifikasi *Tie rod* – Beban 1500 kg

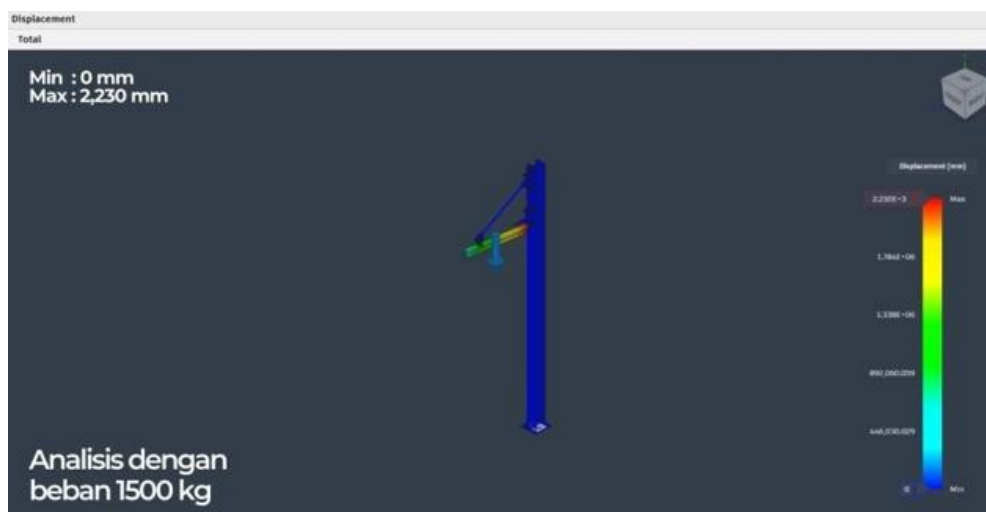
a. *Stress*



Gambar 11. Hasil Simulasi Stress pada beban 1500 kg

Pada beban 1.500 kg, tegangan maksimum naik menjadi 61,32 MPa, namun tetap jauh di bawah tegangan luluh baja. Warna kontur menunjukkan bahwa struktur masih bekerja dalam rentang aman, tanpa tanda-tanda munculnya konsentrasi tegangan berbahaya. Ini membuktikan bahwa desain modifikasi mampu mengatasi beban yang bahkan dua kali lebih besar dari desain awal [8].

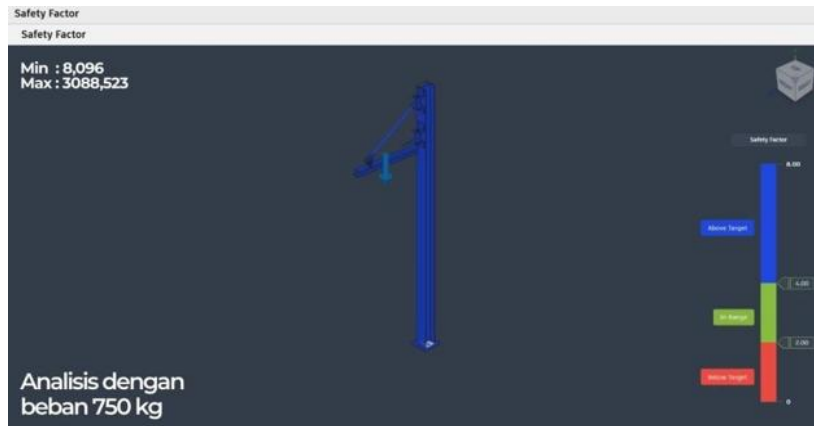
b. *Displacement*



Gambar 12. Hasil Simulasi *Displacement* pada beban 1500 kg

Deformasi maksimum mencapai 2,230 mm, masih dapat diterima untuk *boom* sepanjang 2 meter. Pola deformasi menunjukkan bahwa *Tie rod* tetap bekerja efektif meskipun beban meningkat, dan tidak ada tanda instabilitas atau buckling pada pilar. Defleksi yang terkendali ini merupakan bukti tambahan bahwa *Tie rod* meningkatkan kekakuan konstruksi.

c. *Safety factor*



Gambar 13. Hasil Simulasi *Safety factor* pada beban 1500 kg

Faktor keamanan minimum berada di kisaran 4, jauh di atas batas minimum standar (umumnya $SF \geq 1,5-2$ untuk peralatan angkat). Hal ini menegaskan bahwa desain modifikasi tidak hanya lebih kuat, tetapi juga masih memiliki cadangan kekuatan besar untuk kondisi beban berat [17].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis struktur menggunakan metode elemen hingga (*Finite element Method/FEM*), dapat disimpulkan bahwa desain awal jib *crane* tanpa *Tie rod* masih mampu bekerja dengan aman pada pembebanan 750 kg, ditunjukkan oleh nilai tegangan maksimum sebesar 96,11 MPa yang masih berada di bawah tegangan luluh material ASTM A36 serta faktor keamanan sebesar 2,58. Namun, ketika beban ditingkatkan menjadi 1.000 kg, tegangan maksimum mencapai 286,40 MPa dan melampaui batas luluh material, sehingga faktor keamanan turun menjadi 0,87 dan struktur dinyatakan tidak aman untuk digunakan pada kondisi tersebut.

Penambahan *Tie rod* pada desain modifikasi terbukti memberikan peningkatan performa struktural yang signifikan. Modifikasi ini mampu mengubah mekanisme pembebanan dari sistem kantilever menjadi sistem semi-triangulasi sehingga sebagian momen lentur pada *boom* dialihkan menjadi gaya tarik pada *tie rod*. Akibatnya, tegangan maksimum berkurang secara signifikan, deformasi menjadi lebih kecil, dan faktor keamanan meningkat dibandingkan desain awal. Pada pembebanan 750 kg, tegangan maksimum turun menjadi 30,70 MPa dengan faktor keamanan mencapai 8,10, sedangkan pada pembebanan 1.500 kg tegangan maksimum masih berada pada 61,32 MPa dengan faktor keamanan sekitar 4, yang menunjukkan kondisi struktur masih aman.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi *Tie rod* efektif dalam meningkatkan kekakuan struktur, mengurangi deformasi, menurunkan konsentrasi tegangan pada sambungan *boom*-pilar, serta memperbesar kapasitas angkat jib *crane* hingga mencapai 1,5 ton secara aman berdasarkan hasil simulasi numerik. Oleh karena itu, penambahan *Tie rod* dapat direkomendasikan sebagai solusi

rekayasa yang efisien untuk meningkatkan kapasitas, keandalan, dan keselamatan operasional jib *crane* tanpa memerlukan perubahan besar pada dimensi utama struktur..

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu proses penelitian ini. Kepada mahasiswa Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas semua bantuan dan dukungan yang diberikan terkait penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. R. Aziez, N. E. Setijogiaro, and F. Mulyana, "Perancangan Jib *Crane* dengan Kapasitas Angkat 500 kg untuk Alat Bantu Sumur *Deep well* di PT. X," Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, pp. 1382-1391, 2023.
- [2] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: K. J. Bathe, 2014.
- [3] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002.
- [4] Autodesk, "Set up a Static Stress analysis," Autodesk Fusion Help. [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=SIM-SSA>. [Accessed: Jun. 23, 2026].
- [5] J. Verschoof, *Cranes: Design, Practice, and Maintenance*, 2nd ed. London, U.K.: Professional Engineering Publishing, 2002.
- [6] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 10th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2017.
- [7] ASTM International, *ASTM A36/A36M-19: Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019.
- [8] MatWeb, "ASTM A36 Steel, *plate*," MatWeb Material Property Data. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>. [Accessed: Jun. 23, 2026].
- [9] ASME, *ASME BTH-1-2023: Design of Below-the-Hook Lifting Devices*. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [10] ASME, *ASME B30.11-2020: Monorails and Underhung Cranes*. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [11] *Crane Manufacturers Association of America*, *CMAA Specification No. 74: Specifications for Top Running and Under Running Single Girder Electric Traveling Cranes Utilizing Under Running Trolley Hoist*, Revised ed. Charlotte, NC, USA: MHI, 2020.
- [12] American Institute of Steel Construction, *Steel Construction Manual*, 15th ed. Chicago, IL, USA: AISC, 2017.
- [13] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 8th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2013.
- [14] W. D. Callister, Jr. and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [15] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [16] R. L. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2019.
- [17] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020.
- [18] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 6th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2017.

- [19] S. S. Rao, The *Finite element method* in Engineering, 6th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [20] J. N. Reddy, An Introduction to the Finite Element Method, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.