SINERGI Polmed: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

EVALUASI KEKUATAN STRUKTUR *GANTRY CRANE KNOCK-DOWN* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA PADA *AUTODESK INVENTOR*: TINJAUAN TEGANGAN, DEFORMASI, DAN FAKTOR KEAMANAN

Moch. Fariz Aditya[a*], Sittati Musalamah[b], Lenggogeni[a]

[a]*Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka No. 11, Rawamangun, Jakarta Timur 13320, Indonesia*
[b]*Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka No. 11, Rawamangun, Jakarta Timur 13320, Indonesia*

**Penulis korespondensi: moch_1525422042@mhs.unj.ac.id; farizadit24@gmail.com, (M.F. Aditya), Tel.: +62857-7916-1831*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 20 April 2026
Direvisi pada 23 September 2026
Disetujui pada 29 Oktober 2026
Tersedia daring pada 18 November 2026

Kata kunci:
Gantry crane knock-down; metode elemen hingga; tegangan von Mises; perpindahan total; faktor keamanan

Keywords:
Knock-down gantry crane; finite element analysis; von Mises stress; total displacement; factor of safety

ABSTRAK

Perkembangan industri konstruksi menuntut alat bantu pengangkatan yang aman dan efisien. *Gantry crane* dengan sistem *knock-down* menawarkan fleksibilitas mobilisasi dan instalasi, tetapi kinerja strukturnya perlu dievaluasi terhadap kekuatan dan kekakuan. Penelitian ini bertujuan menganalisis respons statik linear elastis *gantry crane knock-down* menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) melalui *Autodesk Inventor Professional 2024*. Model tiga dimensi menggunakan baja BJ-37, *frictionless constraint* pada *baseplate*, kontak *bonded*, dan beban terpusat 11,196 kN pada *girder*, disertai pembebanan gravitasi. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan von Mises, perpindahan total, dan faktor keamanan. Hasil menunjukkan tegangan maksimum 55,22 MPa, lebih rendah daripada tegangan leleh nominal BJ-37 sebesar 240 MPa. Perpindahan total maksimum 46,37 mm terjadi pada balok portal bawah sisi belakang, sedangkan faktor keamanan minimum 4,34 menunjukkan cadangan terhadap leleh. Analisis pendukung mencakup adaptasi pembebanan CMAA 2015, tekuk kolom, sensitivitas pegas rotasi sambungan, keseimbangan tumpuan, lendutan relatif, dan lima tingkat mesh model referensi. Penelitian ini memberikan dasar evaluasi alat bantu instalasi *Fan Wall Unit* (FWU) dengan membedakan kekuatan material dari kemampuan layan. Kesimpulan dibatasi pada model dan parameter yang dianalisis, verifikasi struktur keseluruhan serta kelayakan operasional tidak ditetapkan berdasarkan hasil model referensi.

ABSTRACT

The construction industry requires safe and efficient lifting equipment. Knock-down gantry cranes offer flexibility in transportation and installation, but their structural performance requires evaluation in terms of strength and stiffness. This study analyzes the linear elastic static response of a knock-down gantry crane using finite element analysis (FEA) in Autodesk Inventor Professional 2024. The three-dimensional model uses BJ-37 steel, frictionless constraints at the baseplates, bonded contacts, and a concentrated load of 11.196 kN applied to the girder, with gravity included. The evaluated parameters are von Mises stress, total displacement, and safety factor. The maximum stress is 55.22 MPa, below the nominal yield strength of BJ-37 steel of 240 MPa. The maximum total displacement of 46.37 mm occurs at the lower rear portal beam, while the minimum safety factor of 4.34 indicates a margin against yielding. Supplementary analyses address adapted CMAA 2015 loading, column buckling, rotational-spring connection sensitivity, support equilibrium, relative deflection, and five reference-model mesh levels. The study provides a basis for evaluating lifting equipment for Fan Wall Unit (FWU) installation by distinguishing material strength from serviceability. The conclusions are limited to the models and parameters analyzed, the reference-model results do not establish full-structure verification or operational suitability.

1. PENGANTAR

Perkembangan teknologi industri modern menuntut adanya sistem pemindahan material yang efisien, aman, dan mampu meningkatkan produktivitas kerja. Salah satu peralatan yang memiliki peran penting dalam sistem tersebut adalah *crane*, yang digunakan untuk mengangkat dan memindahkan beban baik secara vertikal maupun horizontal dalam berbagai sektor industri seperti manufaktur dan konstruksi (Muhammad dkk., 2025). *Crane* bekerja berdasarkan prinsip mekanika struktur yang melibatkan gaya, tegangan, serta deformasi pada elemen-elemen penyusunnya.

Gantry crane merupakan salah satu jenis *crane* yang banyak digunakan karena memiliki struktur sederhana berupa portal *frame* dengan *girder* sebagai titik angkat beban. Selain itu, perkembangan kebutuhan di lapangan mendorong penggunaan *gantry crane* dengan sistem *knock-down*, yaitu struktur yang dapat dibongkar dan dipasang kembali sehingga lebih fleksibel dalam mobilisasi dan instalasi. *Gantry crane* banyak diaplikasikan pada industri dan pelabuhan untuk memindahkan material berat secara efisien (Jalil, 2021). Penggunaan *gantry crane* dapat meningkatkan efisiensi waktu kerja serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga manusia dalam proses pemindahan material (Alamsyah dkk., 2021).

Dalam perancangan *gantry crane*, khususnya pada sistem *knock-down*, aspek kekuatan struktur menjadi faktor utama yang harus diperhatikan karena adanya potensi kelemahan pada sambungan akibat sistem bongkar-pasang. Struktur harus mampu menahan pembebanan eksternal tanpa mengalami kegagalan seperti deformasi berlebih atau keruntuhan. Kegagalan struktur dapat disebabkan oleh tegangan yang melampaui batas material, kelelahan *(fatigue)*, serta kesalahan dalam desain dan pemilihan material (Wibawa, 2020). Oleh karena itu, analisis struktur yang akurat sangat diperlukan untuk memastikan keamanan dan keandalan *gantry crane*.

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, metode elemen hingga *(Finite Element Analysis/FEA)* menjadi salah satu metode yang banyak digunakan dalam analisis struktur teknik. Metode ini memungkinkan pemodelan struktur kompleks dengan membagi sistem menjadi elemen-elemen kecil sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat dianalisis secara numerik (Magnolia, 2025). Penggunaan metode elemen hingga telah banyak diterapkan dalam analisis struktur *crane* untuk mengetahui respons terhadap variasi pembebanan (Imran dkk., 2024).

Salah satu parameter penting dalam analisis struktur adalah tegangan von *Mises*, yang digunakan untuk memprediksi kegagalan material ulet akibat kombinasi tegangan kompleks (Surya dkk., 2022). Selain itu, deformasi *(displacement)* digunakan untuk mengetahui perubahan bentuk struktur akibat pembebanan, sedangkan faktor keamanan *(safety factor)* digunakan sebagai indikator tingkat keamanan desain terhadap batas kekuatan material (Arum dkk., 2025). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan beban eksternal akan menyebabkan peningkatan tegangan dan deformasi serta penurunan nilai faktor keamanan pada struktur *gantry crane* (Kharisma & Yanuar, 2023). Hal ini menunjukkan pentingnya analisis struktur secara komprehensif untuk memastikan bahwa desain yang dihasilkan berada dalam kondisi aman.

Perkembangan perangkat lunak rekayasa, seperti *Autodesk Inventor Professional*, memungkinkan analisis struktur berbasis metode elemen hingga dilakukan secara lebih efisien dan akurat. Perangkat lunak ini mampu mensimulasikan distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan dalam satu lingkungan pemodelan terintegrasi (Ningtyas dkk., 2021). Dengan demikian, penggunaan perangkat lunak Autodesk Inventor menjadi salah satu solusi yang efektif dalam proses evaluasi desain struktur *gantry crane*.

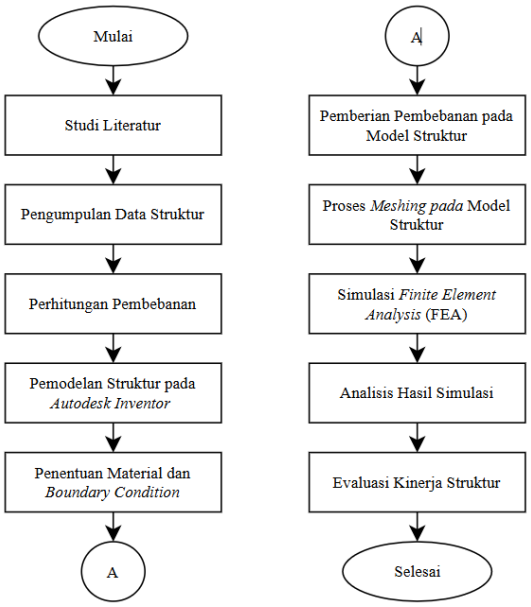
Dalam implementasinya di lapangan, penggunaan *gantry crane* juga banyak dijumpai pada proyek konstruksi khusus seperti pembangunan *data center* yang memerlukan proses instalasi peralatan mekanikal dengan bobot besar dan presisi tinggi. Salah satu komponen yang membutuhkan penanganan khusus adalah *Fan Wall Unit* (FWU), yang memiliki berat signifikan dan harus dipasang secara bertumpuk. Proses pengangkatan komponen ini memerlukan alat bantu yang stabil dan andal untuk meminimalkan risiko kegagalan struktur maupun kecelakaan kerja. Oleh karena itu, analisis struktur *gantry crane* sistem *knock-down* yang digunakan sebagai alat bantu pengangkatan FWU menjadi penting untuk memastikan bahwa struktur mampu bekerja secara aman dan memenuhi kriteria kekuatan yang dipersyaratkan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur *gantry crane* sistem *knock-down* menggunakan analisis statik linear elastis berbasis metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak *Autodesk Inventor Professional 2024*. Analisis difokuskan pada evaluasi tegangan maksimum (von *Mises*), deformasi, dan faktor keamanan akibat pembebanan yang diberikan, sehingga dapat diidentifikasi respons material dan kebutuhan pemeriksaan kemampuan layan.

Kesenjangan penelitian terletak pada keterkaitan antara respons rangka, idealisasi sambungan bongkar-pasang, dan tumpuan tanpa angkur pada alat bantu instalasi FWU. Kebaruan penelitian berfokus pada evaluasi konfigurasi tersebut. Analisis pendukung menguji hipotesis bahwa peningkatan kekakuan rotasi sambungan menurunkan lendutan, tetapi meningkatkan tuntutan momen ujung. Kekakuan pegas diperlakukan sebagai parameter sensitivitas, bukan kekakuan terukur sambungan aktual. Kajian *end-plate* (Gjukaj dkk., 2023) digunakan sebagai acuan dalam menelaah hubungan antara kontak, gaya jepit baut, dan respons momen–rotasi.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan melalui studi literatur, pemodelan struktur *gantry crane*, penentuan spesifikasi material, dan perhitungan pembebanan. Model dianalisis menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) melalui *Autodesk Inventor Professional 2024*. Tahap simulasi meliputi penetapan kondisi batas, pemberian beban, *meshing*, dan penyelesaian numerik. Hasilnya digunakan untuk mengevaluasi tegangan von *Mises*, deformasi, dan faktor keamanan struktur. Alur penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1: Diagram alir penelitian

2.1 Simulasi Analisis Struktur Gantry Crane dengan Autodesk Inventor Professional 2024

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan simulasi numerik statik linear elastis melalui perangkat lunak *Autodesk Inventor Professional* 2024 untuk menganalisis respons struktur *gantry crane* terhadap pembebanan. *Autodesk Inventor* merupakan perangkat lunak berbasis pemodelan tiga dimensi yang dilengkapi dengan fitur analisis struktur, sehingga mampu mengintegrasikan proses pemodelan geometrik dengan simulasi mekanika struktur dalam satu lingkungan kerja. Melalui fitur analisis yang tersedia, distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan dapat dievaluasi secara langsung pada model struktur yang telah dibuat (Ningtyas dkk., 2021).

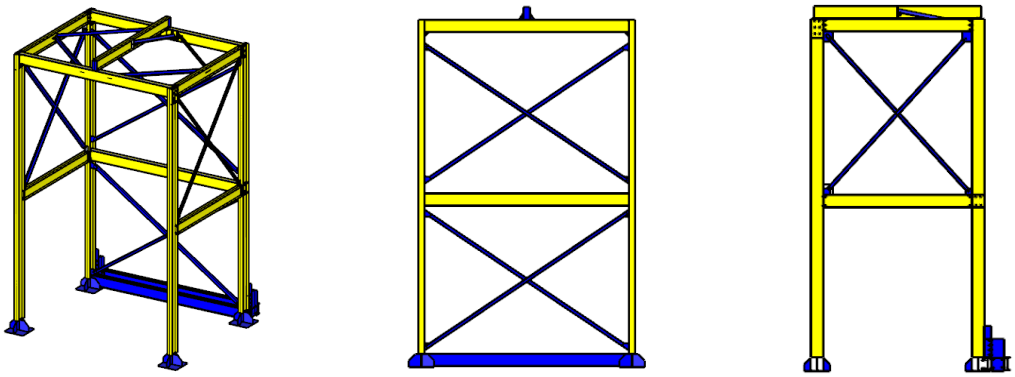
Analisis struktur dalam *Autodesk Inventor Professional 2024* menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA) sebagai dasar perhitungan numerik. Struktur didiskretisasi menjadi elemen-elemen kecil untuk menghitung respons pada bagian-bagian model yang memiliki geometri dan kondisi pembebanan berbeda.

Metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*) merupakan pendekatan numerik yang mampu memodelkan struktur kompleks melalui proses diskretisasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat dianalisis secara akurat (Warman & Arifuddin, 2024). Penerapan metode ini dalam analisis struktur teknik, termasuk *crane*, telah banyak digunakan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan (Gazanata dkk., 2025).

Pendekatan FEA memberikan informasi mengenai distribusi tegangan, deformasi, dan lokasi kritis yang berpotensi mengalami kegagalan (Magnolia dkk., 2025). *Autodesk Inventor Professional 2024* mengintegrasikan pemodelan dan analisis untuk mengevaluasi respons *gantry crane* berdasarkan asumsi material, kontak, dan kondisi tumpuan yang ditetapkan.

2.2 Model Struktur Gantry Crane

Model awal *gantry crane* dibuat menggunakan SketchUp untuk menunjukkan konfigurasi dan geometri rancangan. Visualisasi meliputi tampak tiga dimensi, tampak depan, dan tampak samping, sebagaimana disajikan pada Gambar 2. Model *SketchUp* berfungsi sebagai referensi visual dalam pengembangan model analisis di *Autodesk Inventor*. Penggunaan kedua perangkat lunak dibedakan antara visualisasi rancangan dan perhitungan respons struktur.

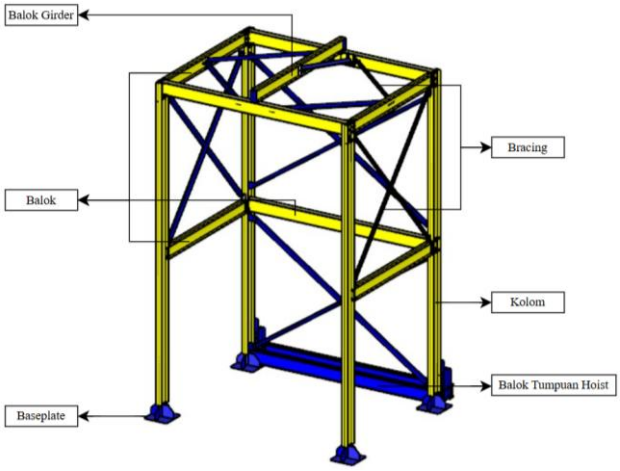


(a) (b) (c)

Gambar 2: Model struktur *gantry crane* (a) Tampak 3D (b) Tampak depan (c) Tampak samping

2.3 Komponen Struktur Gantry Crane

Struktur *gantry crane* terdiri atas komponen penopang dan penyalur beban yang saling terhubung. Masing-masing komponen memiliki fungsi dalam meneruskan gaya dan menjaga kestabilan rangka. Susunan dan hubungan antarkomponen ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Komponen struktur *gantry crane*

Balok *girder* merupakan elemen utama yang berfungsi sebagai titik angkat sekaligus menerima beban langsung selama proses pengangkatan. Beban yang bekerja pada *girder* kemudian didistribusikan ke elemen struktur lainnya, sehingga komponen ini mengalami gaya lentur (*bending*) yang dominan. Selain itu, terdapat balok portal yang berfungsi untuk meningkatkan kekakuan struktur serta menjaga kestabilan antarkolom.

Kolom meneruskan beban dari *girder* ke bagian dasar struktur dan bekerja terutama dalam kondisi tekan. Risiko tekuk meningkat apabila panjang kolom tidak didukung oleh sistem pengaku yang memadai. Elemen *bracing* digunakan untuk meningkatkan kekakuan lateral dan mengurangi deformasi akibat gaya horizontal. Pada bagian bawah kolom, *baseplate* menyalurkan beban ke permukaan lantai. Susunan komponen tersebut membentuk jalur penyaluran beban yang dievaluasi terhadap kekuatan dan kestabilan. Pemeriksaan tekuk kolom referensi disajikan pada Subbab 3.5 dan Lampiran Teknis.

Hubungan antarkomponen pada model solid didefinisikan melalui 108 entri kontak *bonded*. Idealisasi ini tidak mencakup slip, prategang baut, atau pelepasan rotasi pada sambungan sendi dan semi-kaku. Pengaruh kekakuan sambungan dikaji secara terpisah melalui model pegas rotasi dalam Lampiran Teknis. Analisis tersebut mengevaluasi sensitivitas respons terhadap kekakuan sambungan, bukan kapasitas baut aktual (Gjukaj dkk., 2023).

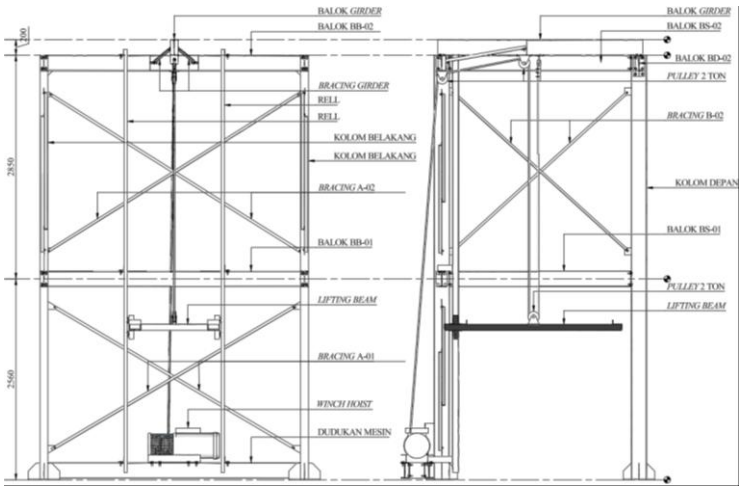
2.4 Data dan Spesifikasi Struktur Gantry Crane

Data pemodelan meliputi dimensi geometrik, sifat material, dan pembebanan struktur. Ketiga kelompok parameter tersebut digunakan untuk menetapkan model numerik dan mengevaluasi respons struktur. Rinciannya disajikan pada subbab berikut.

2.4.1. Dimensi Struktur

Gantry crane dirancang dengan tinggi sekitar 5.400 mm, bentang 3.300 mm, dan lebar 2.300 mm, sesuai kebutuhan pengangkatan *Fan Wall Unit* (FWU) pada proyek *data center*. Dimensi utama dan pembagian ukuran elemen ditunjukkan pada Gambar 4.

Dimensi setiap elemen ditentukan berdasarkan fungsi penopang dan penyaluran bebannya. Ukuran nominal kolom, balok, *bracing*, dan *baseplate* disajikan pada Tabel 1.



(a) (b)

Gambar 4: Dimensi *gantry crane* (a) Tampak depan (b) Tampak samping

Tabel 1: Rincian Dimensi Komponen Struktur *Gantry Crane*

Komponen	Dimensi nominal (mm)
Kolom	5400
Balok Depan/Belakang	3300
Balok Samping	2300
Bracing Samping	3100
Bracing Belakang	3800
Baseplate	400 × 400

Tabel 1 menyajikan dimensi nominal rancangan. Identifikasi komponen model mencakup *bracing* berlabel 40 × 40 × 5 mm dan pelat 400 × 300 × 10 mm, yang berbeda dari dimensi nominal. Kesesuaian label tersebut dengan ukuran fisik belum diverifikasi. Oleh karena itu, perhitungan pendukung dibatasi pada geometri ideal yang dijelaskan dalam Lampiran Teknis.

2.4.2. Spesifikasi Material

Struktur *gantry crane* pada penelitian ini menggunakan material baja struktural dengan jenis profil *Wide Flange* (WF) pada elemen utama struktur, yaitu kolom, balok portal, dan balok *girder*, yang dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam menahan beban lentur dan tekan serta memberikan kekakuan yang memadai pada sistem portal. Selain itu, elemen *bracing* menggunakan profil baja siku yang berfungsi sebagai pengaku untuk meningkatkan stabilitas struktur terhadap gaya lateral. Pada bagian tumpuan, digunakan *baseplate* berupa pelat baja dengan ketebalan tertentu yang berfungsi untuk mendistribusikan beban struktur ke permukaan lantai atau fondasi.

Seluruh elemen struktur pada *gantry crane* ini menggunakan mutu baja yang sama, yaitu BJ-37, dengan tegangan leleh *(yield strength)* sebesar fy = 240 MPa dan tegangan tarik maksimum *(ultimate strength)* sebesar fu = 370 MPa. Penggunaan material dengan mutu yang seragam bertujuan untuk menjaga konsistensi sifat mekanik dalam analisis struktur. Parameter material dan properti penampang yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2 sebagai data input dalam proses pemodelan dan simulasi menggunakan metode elemen hingga.

Parameter material pada model numerik adalah E = 199.948 MPa, fy = 239,938 MPa, fu = 369,559 MPa, dan massa jenis 7.794,64 kg/m³. Nilai tersebut dibedakan dari properti nominal pada Tabel 2 dan tidak berasal dari pengujian material fisik. Momen inersia dan radius girasi penampang ideal untuk pemeriksaan tekuk disajikan dalam Lampiran Teknis *(American Institute of Steel Construction, 2022)*.

Tabel 2: Spesifikasi Material dan Penampang Struktur *Gantry Crane*

Komponen	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Profil WF (Utama)	Tinggi profil	*h*	200	mm
	Lebar *flange*	*bf*	100	mm
	Tebal *web*	*tw*	5,5	mm
	Tebal *flange*	*tf*	8	mm
	Luas penampang	*A*	2715	mm²
	Massa per meter	*w*	21,3	kg/m
Profil Siku (*Bracing*)	Dimensi sisi	-	40 × 40	mm
	Tebal	*t*	4	mm
Profil Plat (*Baseplate*)	Tebal plat	*t*	10	mm
Sifat Material (BJ-37)	Modulus elastisitas	*E*	200.000	MPa
	Tegangan leleh	*fy*	240	MPa
	Tegangan *ultimit*	*fu*	370	MPa
	Rasio Poisson	*v*	0,3	-
	Massa jenis input	ρ	7.794,64	kg/m³

2.4.3. Pembebanan Struktur

Pembebanan struktur mengadaptasi CMAA Specification No. 70 edisi 2015, yang membedakan berat struktur, perangkat pengangkat, muatan, dan tambahan inersia pengangkatan. Standar ini dipilih karena membahas pembebanan crane secara khusus. Ruang lingkupnya mencakup crane multiple-*girder* top-running yang bergerak. Pada rancangan bertitik angkat tetap ini, ketentuannya digunakan sebagai acuan pembebanan dan pembanding kemampuan layan, penerapannya tidak mencakup seluruh persyaratan spesifikasi. Beban pada titik pengangkatan diteruskan melalui sistem *hoist*, *wire rope*, dan *pulley* menuju struktur utama *(Crane Manufacturers Association of America, 2015)*.

Beban angkat statik diperoleh dari penjumlahan massa muatan dan komponen pengangkat yang ikut terangkat, kemudian dikonversi menjadi gaya berat menggunakan Persamaan (1) (Hibbeler, 2017).

$$R = g \sum m_i = 9{,}81 \times 991{,}36 = 9.725{,}2416\, N \quad (1)$$

Dalam Persamaan (1), R adalah total gaya berat muatan terangkat (N), m_i adalah massa tiap komponen (kg), dan g adalah percepatan gravitasi sebesar 9,81 m/s².

Penjumlahan gaya berat mengikuti prinsip superposisi dalam analisis statik (Hibbeler, 2017). Rincian massa dan gaya berat yang diperhitungkan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: Beban Pengangkatan pada *Gantry Crane*

Komponen	Massa / gaya	Satuan
Fan Wall Unit (FWU)	850	kg
Hanger	99,88	kg
Pulley	4	kg
UNP pengangkat	37,48	kg
Total massa	991,36	kg
Gaya berat (R)	9.725,24	N

Selain gaya berat statik, proses pengangkatan menimbulkan efek dinamis akibat percepatan, perlambatan, dan hentakan. Untuk operasi normal, tambahan faktor beban angkat h diadaptasi dari CMAA 70-2015 Pasal 3.3.2.1.4.2, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (2) (Crane Manufacturers Association of America, 2015).

$$h = min\{0{,}50, max[0{,}15, 0{,}005\, V_h]\} \quad (2)$$

Dalam Persamaan (2), h adalah tambahan faktor beban angkat tanpa satuan dan V_h adalah kecepatan pengangkatan dalam ft/min, dengan 1 ft/min = 0,3048 m/min. Faktor pengali muatan adalah (1 + h). Batas faktor tersebut berlaku untuk operasi normal, sedangkan kondisi kejut di luar operasi normal memerlukan evaluasi tersendiri.

Analisis sensitivitas menggunakan tiga skenario faktor beban, yaitu h = 0,15, 0,25, dan 0,50. Ketiganya merupakan parameter kajian karena data kecepatan *hoist* aktual tidak tersedia. Gaya angkat ekuivalen dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$P_h = (1 + h)R \quad (3)$$

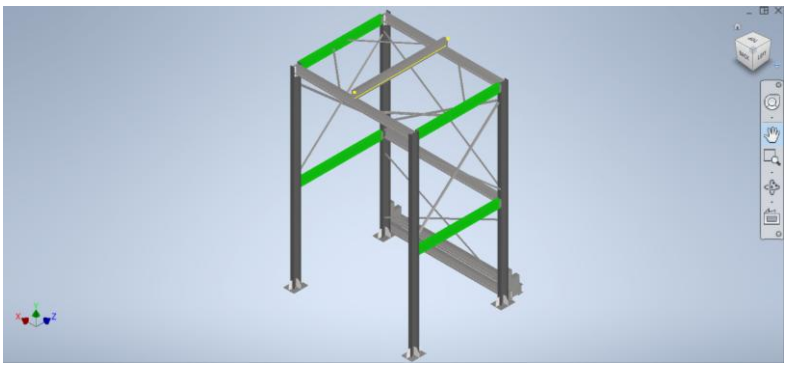
P_h adalah gaya angkat ekuivalen (N). Skenario h = 0,15, 0,25, dan 0,50 menghasilkan P_h masing-masing sebesar 11.184,03 N, 12.156,55 N, dan 14.587,86 N. Dalam formulasi tersebut, batas h = 0,15 berlaku untuk $V_h \leq 9{,}144$ m/min. Penetapan skenario operasi aktual bergantung pada spesifikasi kecepatan *hoist*.

Berat sendiri rangka dihitung secara terpisah dari muatan, yaitu DL = 1.243,7 × 9,81 = 12.200,70 N. Efek beban dinyatakan sebagai S = S(dDL) + S(P_h), dengan d = 1,00 untuk pembanding statik dan d = 1,10 untuk kajian sensitivitas. Pengali 1,10 tidak diperlakukan sebagai ketentuan yang otomatis berlaku pada alat stasioner. Model referensi tidak mencakup *trolley* dan inersia perjalanan. Gaya pada dudukan *pulley* mengikuti resultan vektor tarikan tali. Massa *pulley* 4 kg pada Tabel 3 diasumsikan ikut terangkat, sehingga tidak dihitung kembali sebagai DL (Crane Manufacturers Association of America, 2015).

Pembebanan berbasis CMAA digunakan dalam analisis pendukung pada Subbab 3.5 dan Lampiran Teknis. Analisis solid pada Gambar 10–12 menggunakan beban 2.517 lbf = 11.196,17 N vertikal ke bawah, disertai gravitasi. Beban tersebut berbeda 0,109% dari skenario h = 0,15. Hasil model solid berlaku untuk beban ini, sedangkan hasil skenario CMAA diperoleh dari model pendukung yang dianalisis secara terpisah.

2.5 Model Struktur Gantry Crane pada Autodesk Inventor Professional 2024

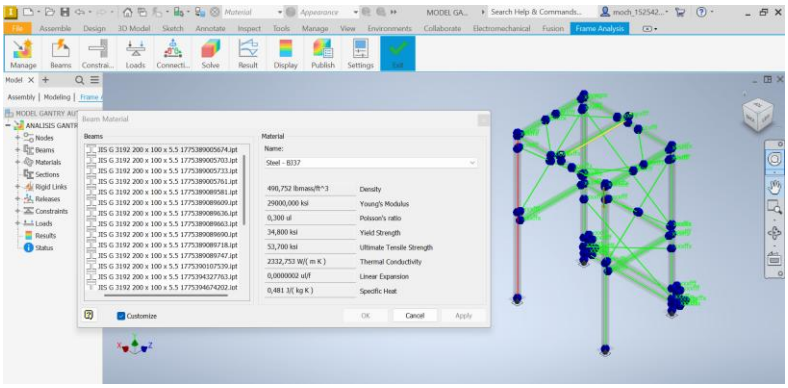
Model tiga dimensi solid *gantry crane* dikembangkan menggunakan *Autodesk Inventor Professional 2024* sebagai dasar analisis elemen hingga. Model merepresentasikan konfigurasi struktur berdasarkan geometri, material, dan kondisi batas yang ditetapkan. Bentuk model ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Model 3D struktur *gantry crane* pada *Autodesk Inventor*

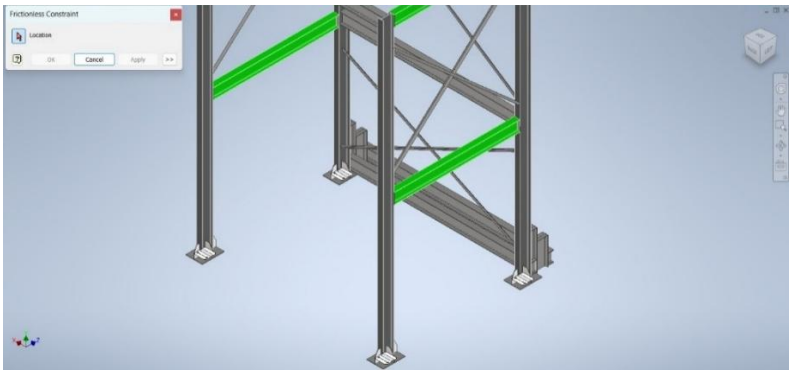
Baja BJ-37 ditetapkan sebagai material elemen struktur. Parameter yang digunakan meliputi tegangan leleh, tegangan ultimit, modulus elastisitas, dan massa jenis. Nilai dalam sistem satuan perangkat lunak dikonversi secara ekuivalen terhadap properti pada Tabel

2. Gambar 6 memperlihatkan pengaturan material dalam lingkungan *Frame Analysis*, sedangkan analisis solid *Stress Analysis* menggunakan parameter numerik pada Subbab 2.4.2.



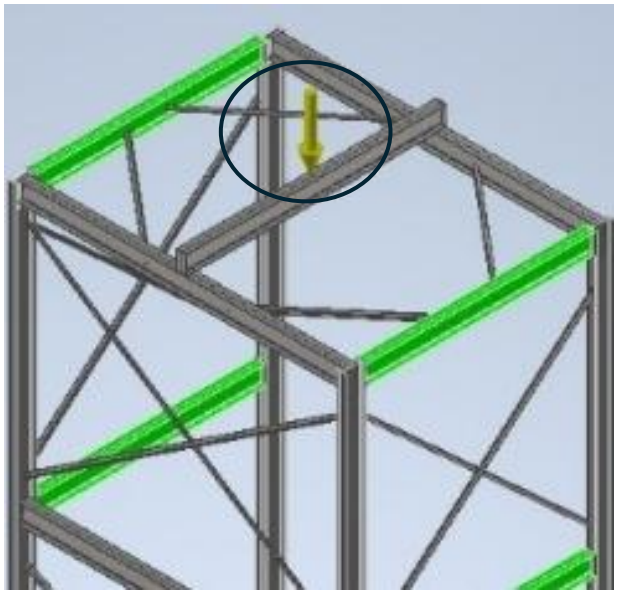
Gambar 6: Ilustrasi pengaturan material pada tahap *Frame Analysis*

Kondisi batas pada *baseplate* dimodelkan menggunakan *frictionless constraint*, yang menahan perpindahan normal terhadap bidang terpilih dan membebaskan perpindahan tangensial. Idealisasi ini tidak setara dengan sendi titik maupun kontak lantai yang memungkinkan terangkatnya *baseplate*. Karena itu, evaluasi geser dan guling dilakukan secara terpisah dari analisis statik model solid. Penerapan kondisi batas ditampilkan pada Gambar 7, sedangkan pemeriksaan stabilitas pendukung disajikan pada Subbab 3.5.



Gambar 7: Perletakan pada *baseplate*

Beban terpusat sebesar 2.517 lbf atau 11,196 kN diterapkan pada titik pengangkatan di *girder* dengan arah vertikal ke bawah pada sumbu global −Y. Gravitasi sebesar 386,220 in/s² atau 9,809988 m/s² turut diterapkan pada model. Daerah penerapan beban ditunjukkan pada Gambar 8. Respons model solid dievaluasi untuk satu skenario pembebanan ini.

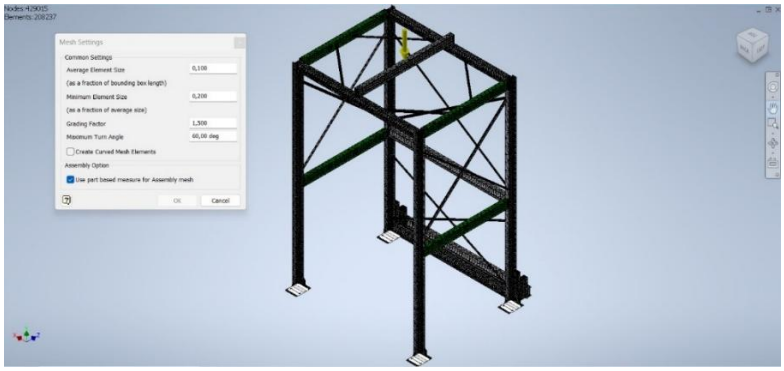


Gambar 8: Penerapan beban terpusat 2.517 lbf pada *girder* ke arah −Y

Proses *meshing* mendiskretisasi model menjadi elemen-elemen kecil sebagai dasar perhitungan elemen hingga. Diskretisasi memungkinkan distribusi tegangan dan perpindahan dihitung pada bagian-bagian struktur sesuai geometri dan kondisi pembebanannya.

Ukuran elemen rata-rata (*average element size*) ditetapkan sebesar 0,10 kali ukuran acuan model, dengan ukuran elemen minimum sebesar 0,20 kali ukuran rata-rata. Grading *factor* sebesar 1,5 digunakan untuk mengatur perubahan ukuran elemen, sedangkan *maximum turn angle* ditetapkan sebesar 60°. Opsi *part-based measure* diaktifkan dan *Create Curved Mesh Elements* dinonaktifkan.

Gambar 9 menunjukkan konfigurasi mesh awal yang terdiri atas 208.237 elemen dan 429.015 node. Model untuk hasil pada Gambar 10–12 menggunakan 209.165 elemen dan 430.677 node. Kedua konfigurasi tersebut tidak membentuk studi konvergensi karena hasil model solid hanya tersedia pada satu tingkat mesh. Pengujian lima tingkat diskretisasi dalam Subbab 3.5 dilakukan pada model balok referensi, dengan ruang lingkup yang berbeda dari model solid Inventor.



Gambar 9: Proses meshing pada model struktur (pengaturan awal)

Simulasi dijalankan untuk memperoleh distribusi tegangan von Mises, deformasi, dan faktor keamanan berdasarkan material, beban, kondisi tumpuan, kontak *bonded*, dan mesh yang telah ditetapkan. Hasil ditampilkan sebagai kontur untuk menunjukkan distribusi respons dan lokasi kritis. Studi menggunakan *Static Analysis* dengan tujuan *Single Point*, sedangkan opsi *Detect and Eliminate Rigid Body Modes* dinonaktifkan. Pengaturan ini tidak mencakup validasi kestabilan terhadap gerak benda tegar atau perilaku kontak lantai.

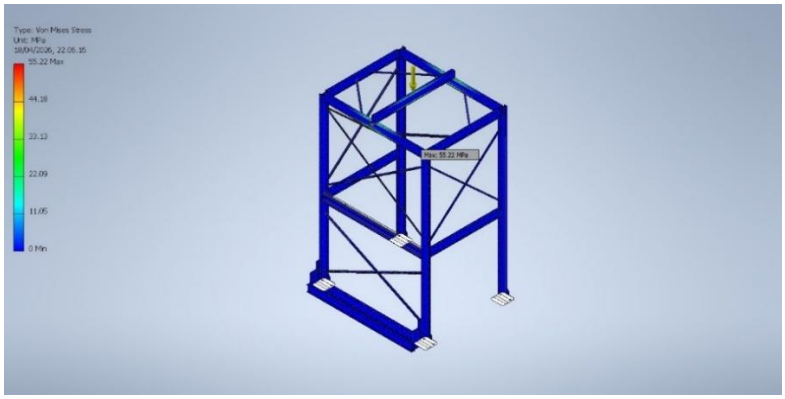
2.6 Analisis Pendukung dan Kriteria Evaluasi

Analisis pendukung menggunakan penampang ideal WF 200 × 100 × 5,5 × 8 mm tanpa *fillet*, dengan E = 199.948 MPa dan fy = 239,938 MPa. Tekuk lentur kolom dievaluasi menurut AISC (2022, Pasal E3), sedangkan kekakuan sambungan direpresentasikan melalui pegas rotasi dengan parameter $\beta = k\theta L/(EI)$. Girder referensi B-G menggunakan bentang asumsi 2.610 mm dan balok portal B-P menggunakan bentang 3.300 mm. Perpindahan vertikal kedua ujung balok ditahan. Model keseimbangan tumpuan menggunakan grid nominal 3,30 × 2,30 m dengan posisi pusat beban simetris. Idealisasi tersebut digunakan sebagai model referensi terpisah dari model solid keseluruhan.

Lendutan relatif dihitung sebagai $\delta rel(s) = uy(s) - [(1 - s/L)uy,A + (s/L)uy,B]$. Nilai L/888 digunakan sebagai pembanding lendutan *girder* akibat beban angkat tanpa inersia vertikal, bukan sebagai batas perpindahan total balok portal bawah (Crane Manufacturers Association of America, 2015). Model elemen balok Euler–Bernoulli dibandingkan dengan solusi analitis pada input yang identik menggunakan 4, 8, 16, 32, dan 64 elemen. Ambang perubahan hasil antarmesh ditetapkan sebesar 5% untuk model referensi. Persamaan, parameter, dan hasil perhitungan lengkap disajikan dalam Lampiran Teknis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tegangan Maksimum (von Mises)



Gambar 10: Hasil analisis tegangan maksimum (*von Mises*)

Hasil simulasi pada Gambar 10 menunjukkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 55,22 MPa pada balok penumpu *girder* bagian belakang. Nilai ini berada di bawah tegangan leleh nominal BJ-37 sebesar 240 MPa, dengan rasio tegangan terhadap leleh sekitar

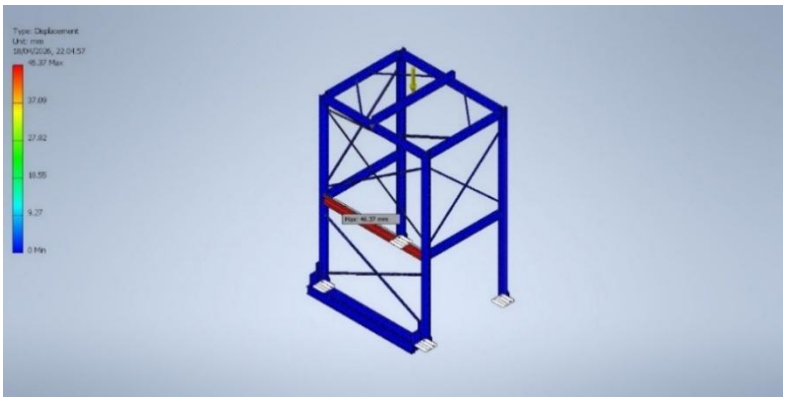
23%. Rasio tersebut menunjukkan cadangan terhadap leleh pada skenario pembebanan yang dianalisis dan tidak digunakan sebagai ukuran efisiensi material. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4: Hasil Analisis Tegangan von *Mises*

Parameter	Nilai
Tegangan Maksimum (von *Mises*)	55,22 MPa
Tegangan Luluh Material (BJ-37)	240 MPa
Lokasi Kritis	Balok penumpu *girder* bagian belakang
Status	Belum mencapai leleh nominal

Respons tegangan dipengaruhi oleh pembebanan dan konfigurasi struktur. Kharisma dan Yanuar (2023) menunjukkan bahwa peningkatan beban pada model yang sama dapat meningkatkan tegangan hingga melampaui batas leleh (Kharisma & Yanuar, 2023). Ariani dan Pulungan (2025) mengkaji *overstress* pada *wire rope* crane (Ariani & Pulungan, 2025), sedangkan Imran dkk. (2024) menganalisis *gantry crane* dengan konfigurasi dan material berbeda (Imran dkk., 2024). Perbedaan objek dan kondisi model membatasi perbandingan langsung terhadap penelitian ini. Tegangan yang rendah terhadap batas leleh menunjukkan cadangan kekuatan material, tetapi belum cukup untuk menyimpulkan *overdesign*. Pada balok penumpu *girder*, reaksi dari pertemuan elemen dapat menimbulkan kombinasi lentur, geser, dan konsentrasi tegangan lokal.

3.2 Deformasi (Displacement)



Gambar 11: Hasil analisis deformasi (*displacement*)

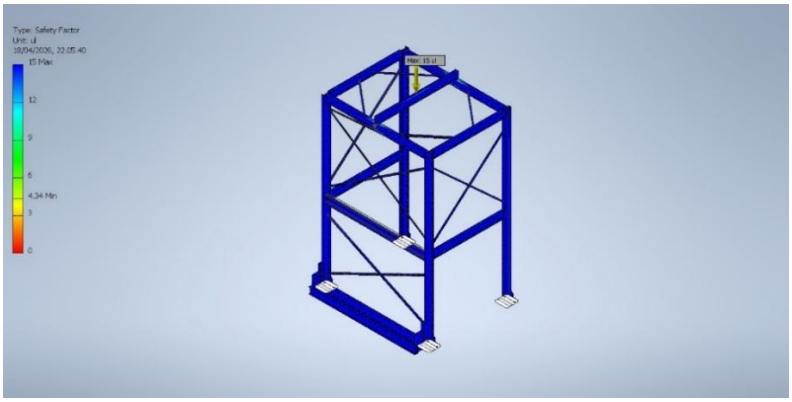
Distribusi perpindahan pada Gambar 11 menunjukkan nilai maksimum sebesar 46,37 mm pada balok portal bawah sisi belakang. Nilai ekstrem komponen Y mencapai −46,3658 mm, sedangkan ekstrem komponen X dan Z masing-masing sekitar ±1,28 mm dan ±0,67 mm. Perpindahan didominasi arah Y. Lokasi perpindahan maksimum tidak serta-merta menunjukkan lokasi momen maksimum, dan besar perpindahan total tidak langsung menyatakan lendutan relatif elemen. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5: Hasil Analisis Deformasi (*Displacement*)

Parameter	Nilai
Deformasi Maksimum	46,37 mm
Lokasi	Balok portal bawah sisi belakang
Arah Dominan	Vertikal

Besarnya deformasi dipengaruhi oleh beban dan kekakuan struktur, yang berkaitan dengan dimensi elemen, konfigurasi rangka, dan kondisi tumpuan (Kharisma & Yanuar, 2023). Purnomo dkk. (2025) menunjukkan perbedaan deformasi pada dua konfigurasi sudut dan posisi *tie-rod jib crane* (Purnomo dkk., 2025) . Temuan tersebut berlaku pada konfigurasi penopang yang dikaji dan tidak menentukan penyebab deformasi *gantry crane* penelitian ini. Perpindahan yang lebih besar perlu ditelaah dengan mempertimbangkan kesetaraan pembebanan serta pergerakan tumpuan. Implikasi terhadap kemampuan layan terutama berkaitan dengan keterarahan gerak beban. Nilai 46,37 mm merupakan perpindahan total struktur. Evaluasi lendutan relatif balok portal bawah memerlukan data perpindahan pada kedua ujung balok serta kriteria batas layanan yang sesuai.

3.3 Faktor Keamanan (Safety Factor)



Gambar 12: Hasil analisis faktor keamanan (*safety factor*)

Faktor keamanan minimum pada Gambar 12 sebesar 4,34 merupakan rasio terhadap tegangan leleh material. Pembagian fy = 239,938 MPa dengan tegangan maksimum 55,2233 MPa menghasilkan 4,34487, sesuai dengan keluaran numerik 4,34486 setelah pembulatan. Faktor ini menunjukkan cadangan terhadap leleh, sedangkan kriteria kekakuan, stabilitas, dan sambungan dievaluasi secara terpisah. Ringkasan faktor keamanan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6: Hasil Analisis Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Parameter	Nilai
Safety Factor Minimum	4,34
Nilai maksimum pada tampilan	15 (keluaran analisis)
Indikator leleh	fy/σ > 1
Status	Cadangan terhadap leleh pada model

Faktor keamanan terhadap leleh perlu dibedakan dari penilaian kekakuan, stabilitas, dan kapasitas sambungan. Studi terdahulu menggunakan konfigurasi serta definisi evaluasi yang tidak selalu setara (Imran dkk., 2024; Kharisma & Yanuar, 2023). Oleh karena itu, nilai faktor keamanan penelitian ini belum cukup untuk menyimpulkan *overdesign* atau inefisiensi material. Angka 15 merupakan nilai maksimum yang ditampilkan pada keluaran analisis dan tidak digunakan untuk menetapkan kapasitas alat. Evaluasi optimasi memerlukan pemeriksaan kekuatan, deformasi, dan stabilitas secara bersamaan, sebagaimana pendekatan (Kulka dkk., 2024).

3.4 Perbandingan Hasil Analisis dengan Penelitian Terdahulu

Perbandingan dengan penelitian terdahulu dilakukan untuk menelaah respons *gantry crane* yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Parameter yang dibandingkan meliputi beban, material, tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Perbedaan konfigurasi serta kondisi analisis dipertimbangkan dalam menafsirkan hasil, sehingga perbandingan tidak terbatas pada besar nilai numeriknya. Ringkasan parameter disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7: Perbandingan Parameter Hasil Analisis Struktur *Gantry Crane*

Parameter	Penelitian Ini	Kharisma & Yanuar (2023)	Imran dkk. (2024)	Interpretasi Teknik
Beban angkat	991,36 kg, beban 11,196 kN	1 – 3 ton	9 ton	Beban dan konfigurasi berbeda
Material	BJ-37 (fy ≈ 240 MPa)	AISI 1045 (fy ≈ 530 MPa)	Aluminium 6061 (fy ≈ 275 MPa)	Material memengaruhi kekuatan dan kekakuan
Tegangan Maksimum	55,22 MPa	Hingga 616 MPa	2,778 MPa	Perbandingan dibatasi kondisi model
Rasio σ/fy	0,230	Hingga 1,162	≈0,010*	Rasio terhadap fy tiap material
Deformasi Maksimum	46,37 mm	10,59 – 31,79 mm	Tidak dibandingkan secara numerik	Perbedaan model membatasi evaluasi kekakuan
Safety Factor	4,34	Definisi faktor keamanan tidak disetarakan	2,07*	*Pasangan σ–SF tidak digunakan sebagai dasar validasi

Tabel 7 menunjukkan perbedaan karakteristik respons antarmodel. Tegangan yang lebih rendah tidak secara langsung menunjukkan tingkat keamanan yang lebih tinggi karena material, beban, dan kondisi tumpuan berbeda. Nilai tegangan 2,778 MPa dan faktor keamanan 2,07 dalam Imran dkk. (2024) tidak sesuai dengan rasio 275/2,778, pasangan nilai tersebut tidak digunakan sebagai dasar validasi kuantitatif. Pada beban 11,196 kN, rasio deskriptif σ/P = 4,932 MPa/kN dan U/P = 4,141 mm/kN masih mencakup pengaruh

gravitasi. Perbandingan ini menegaskan perlunya evaluasi kekuatan dan kemampuan layan secara terpisah, bukan penilaian efisiensi material berdasarkan faktor keamanan saja.

3.5 Pemeriksaan Pendukung Struktur dan Verifikasi Numerik

Tabel 8 merangkum hasil perhitungan analitis dan model elemen balok yang didefinisikan pada Subbab 2.6. Analisis pendukung ini terpisah dari simulasi model solid Inventor. Ketiga skenario CMAA menggunakan massa angkat yang sama, yaitu 991,36 kg. Respons B-P pada Tabel 8 dihitung untuk h = 0,50 dan d = 1,10, sedangkan hasil seluruh skenario dan sensitivitas faktor berat sendiri disajikan dalam Lampiran Teknis.

Tabel 8: Ringkasan analisis pendukung pada model referensi

Pemeriksaan	Hasil perhitungan	Batas interpretasi
Tekuk kolom	Pc,ASD = 181,690, 47,477, 11,869 kN untuk KL = 2.700, 5.400, 10.800 mm.	Tekuk lentur penampang ideal, interaksi tekan–lentur kolom aktual tidak dievaluasi.
Sambungan knock-down	Pada B-P C50, β = 0 → 10 menurunkan δ dari 1,716 ke 0,639 mm, momen ujung naik dari 0 ke 2,784 kN·m.	Sensitivitas pegas rotasi, kapasitas baut/endplate dan nilai β aktual tidak ditentukan.
Stabilitas tumpuan	Pada lebar 2,30 m, batas awal kehilangan reaksi H = 2,598 kN tanpa muatan, 4,669 kN dengan muatan statik.	Pusat massa simetris, elevasi gaya 5,40 m. Nilai H menyatakan awal kehilangan reaksi, bukan beban izin.
Lendutan relatif	B-G: δLL = 1,023 mm, pembanding L/888 = 2,939 mm, rasio 0,348.	Bentang asumsi 2.610 mm, evaluasi terpisah dari perpindahan total 46,37 mm pada portal bawah.
Konvergensi dan pembanding	4/8/16/32/64 elemen, galat tegangan dua mesh terhalus +0,453% dan −0,445%, perubahan 0,902%.	Model elemen balok dan solusi analitis dengan input identik, tidak mencakup konvergensi mesh solid.

Analisis pendukung menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan sambungan menurunkan lendutan sekaligus meningkatkan tuntutan momen ujung. Kapasitas tekuk dipengaruhi oleh panjang efektif, sedangkan keseimbangan tumpuan dipengaruhi oleh konfigurasi dan posisi pusat massa. Kesesuaian solusi analitis dengan model numerik berlaku pada model referensi yang sama. Pada model solid, pemeriksaan bersyarat dengan asumsi seluruh massa menerima gravitasi dan seluruh reaksi tercakup menghasilkan P + mg = 23,397 kN, sedangkan reaksi arah Y sebesar 22,126 kN. Selisih 5,43% menunjukkan bahwa keseimbangan global belum terverifikasi, massa efektif, pembagian reaksi, dan kondisi kontak masih memerlukan pemeriksaan.

4. KESIMPULAN

Analisis statik linear elastis *gantry crane knock-down* menghasilkan tegangan von Mises maksimum 55,22 MPa, perpindahan total maksimum 46,37 mm pada balok portal bawah sisi belakang, dan faktor keamanan minimum 4,34. Tegangan berada di bawah batas leleh nominal BJ-37. Temuan ini menunjukkan cadangan terhadap leleh pada model yang dianalisis, tetapi belum menetapkan kelayakan operasional secara menyeluruh. Analisis pendukung memperlihatkan pengaruh panjang efektif kolom, kekakuan rotasi sambungan, dan keseimbangan tumpuan terhadap respons struktur. Pengujian lima tingkat mesh menunjukkan kesesuaian model elemen balok dengan solusi analitis, hasil tersebut tidak mencakup konvergensi model solid keseluruhan. Penelitian ini memberikan dasar evaluasi kekuatan dan penetapan prioritas pemeriksaan kemampuan layan pada alat bantu instalasi FWU.

Penelitian lanjutan perlu memeriksa keseimbangan reaksi dan kesesuaian geometri serta pembebanan, menguji konvergensi mesh solid, dan mengevaluasi lendutan relatif, kapasitas sambungan baut, serta stabilitas tumpuan tanpa angkur. Verifikasi melalui model pembanding yang setara atau pengujian dengan prosedur keselamatan diperlukan untuk mendukung penetapan kelayakan lapangan. Optimasi penampang sebaiknya dilakukan setelah persyaratan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas dievaluasi secara bersama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta atas dukungan pendanaan melalui Program Pendanaan Riset BLU Tahun 2026.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun nonfinansial yang dapat memengaruhi hasil, analisis, atau interpretasi penelitian ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan hanya untuk memperbaiki bahasa, tata bahasa, dan keterbacaan. Seluruh isi telah ditinjau kembali dan menjadi tanggung jawab penuh penulis.

KONTRIBUSI PENULIS

Moch. Fariz Aditya: Konseptualisasi, metodologi, investigasi, kurasi data, analisis formal, visualisasi, serta penulisan draf awal.

Sittati Musalamah: Supervisi metodologi dan analisis struktur, telaah interpretasi hasil, serta penulisan tinjauan dan penyuntingan substansi teknis.

Lenggogeni: Supervisi penyusunan naskah, pengembangan argumentasi ilmiah dan sistematika pembahasan, serta penulisan, tinjauan dan penyuntingan.

DAFTAR PUSTAKA

Alamsyah, A., Purnata, H., & Yusuf, M. (2021). Prototype Mini Crane Pemindah Barang Berbasis Sistem Otomasi. Jurnal Jaringan Telekomunikasi, 11(3), 155–160.

American Institute of Steel Construction. (2022). Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22). https://www.aisc.org/aisc/explore-aisc/aisc-360/

Ariani, F., & Pulungan, B. S. (2025). Finite Element Analysis and Root Cause Analysis of Wire Rope Failure in STS Cranes. Jurnal Dinamis (Scientific Journal of Mechanical Engineering), 13(2), 82–87.

Arum, A., Anjani, R. D., & Ujiburrahman. (2025). Analisis Statik Footrest Sepeda Motor terhadap Variasi Desain dan Kondisi Pembebanan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Metrotech: Journal of Mechanical and Electrical Technology, 4(2), 68–76.

Crane Manufacturers Association of America. (2015). Specifications for top running bridge and gantry type multiple girder electric overhead traveling cranes (CMAA Specification No. 70, revised 2015).

Gazanata, M. E., Rudiat, & Irfani, R. (2025). Simulasi Rangka Gudang Terhadap Pembebanan Hoist Crane Double Grider 2 Ton Divisi GSCM PT. Xx. Jurnal Pendidikan Teknik Mesin UNDIKSHA, 13(2), 224–234.

Gjukaj, A., Salihu, F., Muriqi, A., & Cvetanovski, P. (2023). Numerical behavior of extended end-plate bolted connection under monotonic loading. HighTech and Innovation Journal, 4(2), 294–308.

Hibbeler, R. C. (2017). Structural Analysis in SI Units. Pearson Prentice Hall.

Imran, A. I., Aminur, Samhuddin, & Widana, I. M. (2024). Desain dan Analisis Finite Elemen Rangka Gantry Crane Menggunakan Software Autodesk Inventor Professional 2024. PISTON: Jurnal Teknologi, 9(2), 51–55.

Jalil. (2021). Analisa kekuatan gantry crane tipe ECT-15 pada saat digunakan di Pelabuhan Kijing, Pontianak, Kalimantan Barat. Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan, 2(1), 25–29.

Kharisma, A. A., & Yanuar, D. M. (2023). Simulasi Kekuatan Rangka Gantry Crane Single Girder Menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Analysis). Jurnal Ilmiah Teknologi dan Rekayasa, 28(2), 146–158.

Kulka, J., Manti?, M., Grega, R., Siman, M., Kopas, M., & Maláková, S. (2024). Optimisation of box girder design of overhead cranes. Applied Sciences, 14(21), 9926.

Magnolia, A.-N. (2025). Analisis Statik Linear Struktur Crane Menggunakan Metode Elemen Hingga Berbasis Simulasi Beam Pada Berbagai Material Dan Kondisi Pembebanan. Integra-STEM, 1(2), 1–8.

Magnolia, A.-N., Murti, A. W., Dityamri, A. G., & Anwar, S. (2025). Analisis Struktural Connecting rod Baja AISI 1045 Menggunakan Metode Finite Element dan Simulasi SimScale untuk Evaluasi Tegangan dan Deformasi. JVS: Jurnal Vokasi Saintek, 1(1), 18–23.

Muhammad, F. A., Fadli, R., Marzuki, M. W., Salam, A. A., & Hidayat, A. (2025). Rancang Bangun Mini Crane Mesin Hoist Electric Sederhana Kapasitas 500 Kg. Jurnal TEMATIS : Teknologi Manufaktur dan Industri, 7(2), 44–54.

Ningtyas, A. H. P., Ayunaning, K., Prambudiarto, B. A., Pahlawan, I. A., & Maulana, I. (2021). Implementasi penggunaan software Autodesk Inventor dalam meningkatkan kompetensi dalam menggambar teknik pada pelajar kejuruan. DedikasiMU: Journal of Community Service, 3(2), 925–935.

Purnomo, S. A., Mulyanto, T., Supriyono, & Muchlis, A. (2025). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Tie-Rod terhadap Kinerja Struktural Wall Mounted Jib Crane. Jurnal Teknik dan Kajian Multidisiplin Aplikatif, 1(2), 53–62.

Surya, M., Munadi, & Haryanto, I. (2022). Rancang Bangun Dan Manufaktur Chassis Robot Automated Guided Vehicle (Agv) Sebagai Prototipe Alat Transportasi Barang Pada Perusahaan Garmen. JTM: Jurnal Teknik Mesin, 10(2).

Warman, A., & Arifuddin, M. (2024). Pemodelan Analisis Struktur Menggunakan Aplikasi Berbasis Elemen Hingga: Artikel Review. Journal of Infrastructure and Construction Technology, 2(2), 81–89.

Wibawa, L. A. (2020). Desain dan Analisis Tegangan Struktur Crane Kapasitas 10 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Muara Sains Teknologi Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, 4(2), 201–210.