

PERANCANGAN GIRDER PADA FLEKSIBEL GANRTY CRANE KAPASITAS 1 TON

Rachmad Imbang Tritjahjono¹, Ramadhan², Destri Muliastri³, Casiman Sukardi⁴, Yun Gemilang⁵,

^{1,2,3}Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung,

^{4,5}Politeknik Manufaktur Bandung

*Email: ¹r.imbang@polban.ac.id

ABSTRAK

Peralatan pengangkat dan pengangkut merupakan salah satu kunci pelaksanaan pekerjaan baik di Industri manufaktur maupun konstruksi. Berbagai kendala pemidahan barang seringkali menjadi hambatan operasional terutama akibat keterbatasan akses. *ganrty crane* merupakan salah satu alternatif peratan pengangkat yang memiliki fleksibilitas tinggi. Artikel ini melaporkan hasil penelitian terhadap komponen utamanya, yaitu batang *girder*. Komponen ini mendapat kontak langsung pembebanan pada saat dilakukan pekerjaan *lifting and rigging*. Metode penelitian ini dilaksanakan dengan membandingkan antara model kalkulasi manual dan CAE menggunakan perangkat lunak Solidworkss Simulation. Dari dua metode tersebut dapat dilaporkan bahwa penelitian ini menghasilkan kesimpulan yang tidak jauh berbeda, berturut turt sebesar 23,091 dan 25,54 MPa untuk kalkulasi manual dan metode elemen hingga. Lebih lanjut, pada metode elemen hingga dengan pembebanan kontak langsung diperoleh tegangan sebesar 40.52 MPa. Dari ketiga perhitungan tegangan yang terjadi, dapat diperoleh sebuah kesimpulan bahwa factor keama strukturan telah melampaui persyaratan yang ditetapkan dalam standar. Selanjutnya, dengan memanfaatkan diagram Goodman, mitigasi terhadap kemungkinan terjadinya patah lelah menunjukkan kondisi aman. Berdasarkan laporan penelitian, potensi *self-healing* belum memungkinkan untuk dijadikan sebagai rujukan pada material ukuran butir dengan orde micron.

Kata kunci: *Material Handling, Ganrty crane, Girder, Metode Elemen Hingga.*

ABSTRACT

Lifting and transporting equipment is one of the keys to carrying out work in the manufacturing and construction industries. Due to limited access, various obstacles must be overcome in some working areas. A ganrty crane is an alternative lifting equipment that has high flexibility. This article reports the research results on the girder's main components. This component gets direct contact with loading when lifting and rigging work is carried out. This research method was conducted by comparing manual calculation models and CAE using the Solidworkss Simulation software. From these two methods, this study yielded 23.091 and 25.54MPa for manual calculations and the finite element method, respectively. Furthermore, in the finite element method with direct contact loading, a stress of 40.52MPa is obtained. From the three stress calculations, it can be concluded that the safety factor has exceeded the requirements set out in the standard. Furthermore, utilizing the Goodman model, mitigating the possibility of fatigue failure also indicates a safe condition. Based on recent research reports, a potential self-healing is not yet possible to be recognized well especially for metals having a grain size of micron.

Keywords: *Material Handling, ganrty crane, girder, Finite Element Method*

I. PENDAHULUAN

Ganrty crane merupakan alat angkat yang bekerja secara periodik untuk mengangkat dan memindahkan objek yang memiliki dimensi

serta berat diluar kapasitas manusia. Kebutuhan peralatan pengangkat maupun pengangkut terus meningkat. Konsekuensinya berbagai usaha inovasi terus dilakukan (Liang et al., 2023)

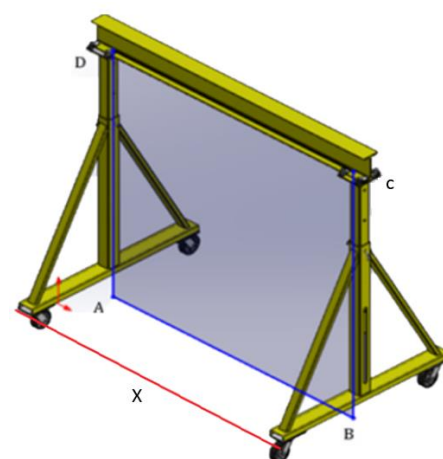
(Patel et al., 2020) (Xu et al., 2023). Salah satu komponen penting dari *gantry crane* ini adalah balok overhead didukung oleh kaki penopang berbentuk segitiga dan bergerak di atas roda, trek, atau sistem rel. *gantry crane* membawa jembatan (*girder*), troli, dan kerekan (*hoist*). Alat angkat ini dapat digunakan di dalam maupun di luar ruangan. Gerak kerja *gantry crane* konvensional meliputi (i) gerak perpindahan *hoist*, (ii) gerakan transversal, dan (iii) gerakan longitudinal/travelling (Jefriansyah & Ma'ruf, 2018)(Karder et al., 2022) (Nakamura & Nagayoshi, 2022). Fleksibilitas dari alat pengangkat ini dilengkapi dengan adanya kemungkinan pengaturan tinggi kolom atau batang penopang, sehingga dapat diatur menyesuaikan ketersediaan ketinggian dan lebar akses. Hal lain yang harus diperhatikan adalah persoalan stabilitas maupun osilasi beban selama proses mengangkat, memindahkan maupun meletakkan (Vu et al., 2022)(Beham et al., 2022) (Thomas & Sawodny, 2020)(Jaafar et al., 2013). Pada model terdahulu, fleksibilitas pengaturan ruang angkat beban masih terbatas pada pengaturan ketinggian yang dikendalikan oleh kolom (tiang utama) sebagaimana ditunjukkan pada batang AD dan BC (Gambar 1). Dengan model konstruksi ini posisi peletakan beban yang diangkat berada pada area dibawah *girder*, yang digambarkan dengan area ABCD sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Posisi *girder* pada model ini ditopang langsung oleh kolom yang tegak lurus antara satu dan lainnya. Sehingga posisi horizontal *girder* lebih terjamin. Demikian pula posisi sumbu kerja *hoist* dapat dijamin selama tinggi ke dua kolom sama tinggi dan tidak diharapkan ada beban angin (Su et al., 2023) (Ileš et al., 2015)

Untuk *gantry crane*, memiliki ruang gerak tiga dimensi ditunjukkan pada Gambar 2. Ruang gerak tiga dimensi dimaksud memiliki ruang kerja minimum dan maksimum ditentukan yang ditentukan oleh posisi kolom dan batang dasarnya. Kelebihan dari alat angkat model ini antara lain (i) dapat menjangkau posisi pinggir, (ii) dengan menyesuaikan akses yang akan dilalui dan (iii) mampu meletakkan muatan pada posisi garis AB maupun CD. Sebagai konsekuensi, batang *girder* harus dapat dipertahankan horizontal. Dengan persyaratan tersebut, rancangan baru ini menuntut stabilitas posisi dan memenuhi persyaratan serta keamanannya (Brian et al., 2022) Pada naskah

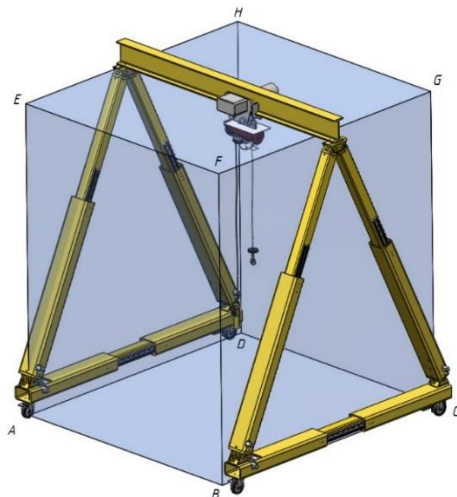
ini dilaporkan kajian khusus pada batang *girder* baik dari sisi tegangan yang bekerja dan evaluasi kemungkinan gagal akibat lelah.

Analisis tegangan pada batang *girder* dilakukan dengan dua pendekatan yaitu (i) melalui kalkulasi manual dan (ii) dengan memanfaatkan *software Solidworks*. Evaluasi tegangan yang bekerja dilakukan dengan asumsi batang beam dan pembebanan pada bagian yang terkena kontak langsung dengan *hoist* (V.a. Kopnov, 1999)

Selain hal tersebut atas, *girder* juga dievaluasi untuk memastikan bahwa struktur yang dirancang tidak akan mengalami kegagalan akibat fenomena patah akibat lelah. Untuk kasus ini diperlukan analisis tambahan, dengan menggunakan diagram Goodman (Weiss et al., 1963)[(Heckel & Christ, 2010)][(Berkovits & Fang, 1993)]. Fenomena *self-healing* pada suatu retakan telah disampaikan oleh Zang *et al.* (Zhang et al., 2020). Will Dunham dalam publikasi melalui Reuter menyampaikan temuannya mengenai *self-healing*. Namun, sejauh ini, temuan tersebut masih terbatas pada material dengan struktur berskala nano meter (Ari & Wibawa, 2020). Argumen yang mendasari fenomena tersebut diyakini bahwa pada skala atomic *self-healing* memerlukan energi yang rendah. Dengan demikian pada kasus penelitian ini fenomena tersebut belum dapat dipertimbangkan untuk material dengan struktur mikro berorde micro meter.



Gambar 1. Ruang kerja dibawah *girder* berbentuk bidang 2 dimensi sebagaimana ditunjukkan oleh bidang warna biru.



Gambar 2. Ruang kerja gantry crane.

II. METODE PENELITIAN

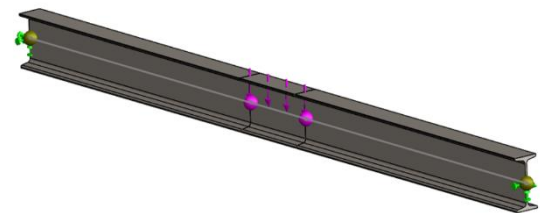
II.1 Investigasi Struktur Mikro dan Komposisi

Sebagai acuan pada penelitian ini dipilih baja struktur dengan kategori ASTM A36 yang ekuivalen dengan kelompok standar DIN St 37. Pengujian kesamaan diteliti dengan membandingkan kandungan paduannya antara hasil penelitian yang telah dipublikasikan dengan analisa elementer dengan Spektrometer HITACHI FM EXPERT dan juga hasil EDS yang di ekstrak menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Struktur mikro baja ini dilakukan dengan metalografi dengan memanfaatkan perangkat mikroskop optik. Tahap ini diperlukan untuk memastikan kesesuaian spesifikasi bahan serta orientasi struktur mikro yang akan digunakan.

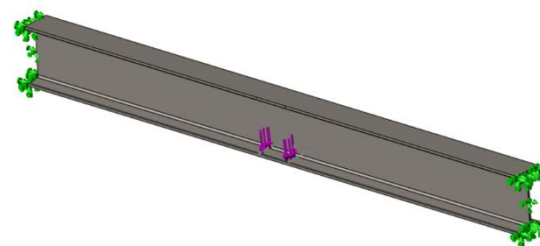
II.2 Investigasi Tegangan

Metode yang digunakan diawali dengan model balok sederhana yang kemudian dikomparasikan dengan hasil investigasi menggunakan perangkat lunak Solidworks. Pada pengujian dengan perangkat lunak ini dilakukan dengan dua pendekatan model (i) Analis CAE Beam dan (ii) Analis CAE pembebanan aktual. Acuan pembebanan kedua model tersebut dapat di lihat pada Gambar 3. Simulasi dapat dilihat pada diagram alir sebagaimana disajikan pada Gambar 4. Terkait dengan beban, gantry crane dirancang dengan kemampuan mengangkat beban 1ton. Namun perlu juga diperhatikan bahwa selain beban tersebut terdapat pula beban tambahan lain seperti (i) hoist dan (ii) hook sehingga total

beban yang harus didukung oleh girder ditetapkan sebesar 13734N, yang selanjutnya dipergunakan untuk investigasi tegangan yang terjadi pada ke dua model tersebut.



(a)



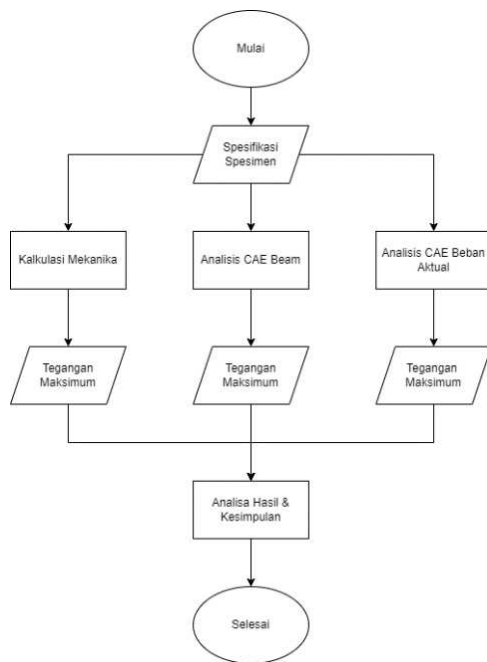
(b)

Gambar 3. Model pembebanan (a) CAE Beam dan (b) CAE pembebanan actual. Kedua model ini dilakukan dengan meshing 0,5.

II.3 Mitigasi Patah Lelah

Untuk memastikan bahwa girder tidak akan mengalami patah lelah, maka dilakukan investigasi lanjutan dengan memanfaatkan diagram Goodman. Pada proses ini dipetakan setiap resiko yang muncul akibat pembebanan yang dilakukan. Terkait dengan model oskilasi ataupun fluktuasi beban pada penelitian ini dilakukan dengan asumsi tidak ada beban kejutan baik selama proses pengangkatan, penurunan maupun pemindahan.

Pada Gambar 4 penggunaan metode komparatif yang digunakan berupa input spesifikasi angkat beban murni crane yaitu sebesar 1 Ton dengan tambahan beban berupa komponen standar seperti (i) hoist, (ii) hook (iii) tali yang diasumsikan seberat 110kg. Hasil akhir dari berbagai metode perhitungan manual serta metode analisa numerik beam dan pembebanan aktual dengan hasil akhir berupa tegangan maksimal pada batang. Selanjutnya akan dilakukan analisa perbandingan tegangan pada tiap metode (Wibawa, 2020). Pengujian beban pada crane sendiri mengacu pada standar DIN EN 13001-1 dimana pengujian dinamis berkisar 100% s.d 125% beban maksimal (Sowa & Kwiaton, 2017)

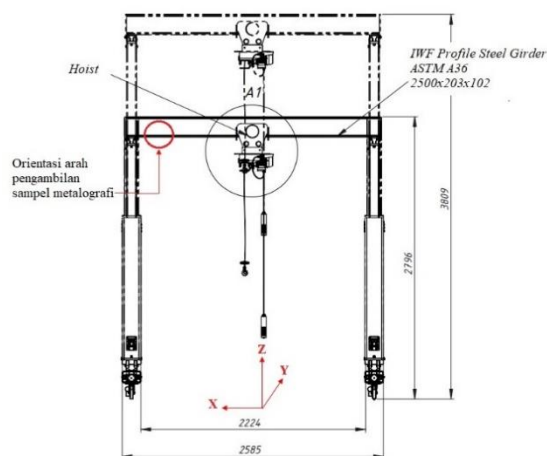


Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

III. HASIL

III.1. Karakterisasi Baja ASTM A36.

Sebagai gambaran hasil perancangan *ganrtty crane* yang telah dilakukan dan objek yang dievaluasi dapat di cermati pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Hasil perancangan konstruksi *ganrtty crane*. Batang *girder* dalam perancangan ini menggunakan baja ASTM A36.

Pada evaluasi ini diasumsikan tidak ada model beban pendulum yang mengakibatkan beban arah sumbu Y. Untuk menghindari model

beban tersebut maka kecepatan gerak *ganrtty crane* ke arah sumbu y harus dikendalikan dengan optimal. Demikian juga oskilasi beban vertikan ke arah sumbu Z saat mengangkat, memindahkan dan menurunkan dapat dikendalikan dengan membatasi kecepatan maksimumnya. Sementara itu pergerakan searah sumbu X memiliki resiko beban model pendulum yang lebih rendah.

Evaluasi terhadap komposisi paduan baja ASTM A36 pertama dilakukan dengan menggunakan Spectroscopy HITACHI model FM Expert seperti tercantum pada Gambar 6. Demikian juga selama proses penelitian struktur mikro mempergunakan perangkat SEM, uji komposisi juga dilaksanakan melalui EDS. Pelaksanaan uji komposisi tersebut diperbandingkan dengan laporan sebelumnya yang dilakukan oleh Sajid dan Kiran (Sajid & Kiran, 2018a). Spektrum unsur utama berupa Fe di sajikan pada Gambar 7. Data lengkap unsur paduan dapat dicermati pada table 1. berikut.

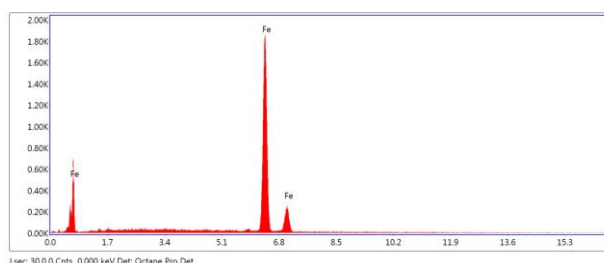


Gambar 6. Karakterisasi unsur paduan

Data paduan yang diperoleh dari pengujian dengan spektroskopi di Polban, EDS dan referensi menunjukkan komposisi yang masuk dalam standar. Perbedaan prosentasi paduan disebabkan oleh jumlah unsur paduan yang diukur oleh masing masing alat. Hal tersebut tercermin dengan kenaikan prosentase Fe berbanding lurus dengan jumlah unsur yang merupakan luaran dari masing masing pengukuran. Namun demikian dari ketiga data pada Table 1 tersebut diyakini bahwa material sesuai dengan hasil pengukuran oleh Sajid dan Kiran (Sajid & Kiran, 2018b). Untuk itu sifat mekanik yang dilaporkan pada Tabel 2 dapat dipakai sebagai basis evaluasi lanjutan, yaitu mitigasi kegagalan struktur akibat lelah.

Tabel 1. Komposisi paduan baja ASTM A36

Unsur paduan	Spectrometer (%)	EDS (%)	(Sajid & Kiran, 2018b) (%)
C	0,135	0,1296	0,1500
Mn	0,794	0,8346	0,6900
P	0,0217	0,0113	0,0180
S	0,0349	0,0320	0,0040
Si	0,343	0,3101	0,1800
Cu	0,155	0,1804	0,2400
Cr	0,0591	0,0558	0,1500
Ni	0,0707	0,0857	0,0880
Mo	0,0342	0,0257	0,0195
V	0,0010	0,0005	0,0048
Ti	0,0013	0,0016	0,0012
Nb	0,0015	0,0032	0,0024
Al	0,0012	0,00067	-
Co	0,0069	-	-
W	0,0050	0,0035	-
Zr	0,0024	0,0000	-
As	0,0059	-	-
Sn	0,0126	0,01479	-
B	0,0005	-	-
Ca	0,0017	-	-
Pb	0,003	0,00069	-
Bi	0,0013	-	-
Zn	0,0022	0,00587	-
Sb	0,0030	0,00289	-
Se	0,0020	-	-
Ta	0,0150	-	-
Fe	98,29	98,3124	98,4521



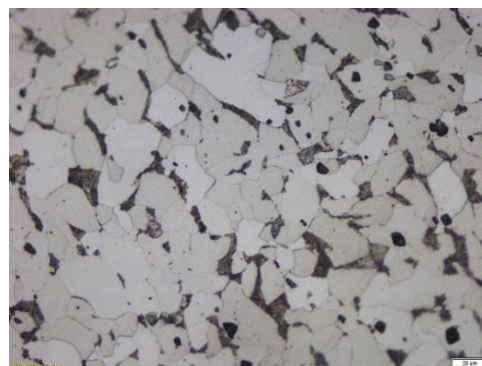
Gambar 7. Spektrum EDS untuk ASTM A36.
Total prosentasi Fe adalah 98,3124%

Berbasis pada data ini maka pengujian dapat dilanjutkan dengan metalografi optik. Metalografi dilakukan bertahap dengan pembesaran yang berbeda. Pembesaran yang lebih besar dan dengan menampilkan fasa perlit yang menonjol dapat memastikan asumsi awal bahwa (i) baja memiliki bentuk butir yang lebih

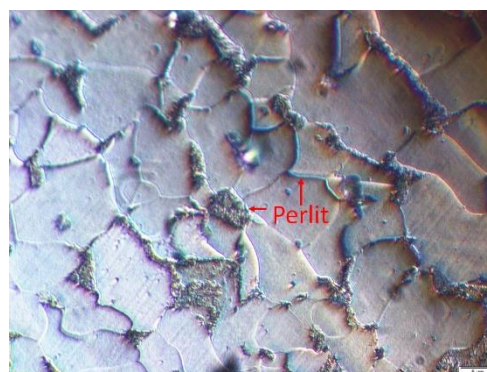
equiaxial dan (ii) kesan batas butir tebal dan beberapa titik didalam butir pada Gambar 8 (a) adalah fasa perlit dan bukan cacat kristal.

Hasil metalografi menunjukkan adanya butir yang lebih *equiaxial*. Tidak ada data bentuk butir yang lonjong searah dengan sumbu X. Dengan demikian asumsi awal bahwa baja ASTM A36 memiliki butir *equiaxial* dapat diterima.

Hasil kajian literatur terkait dengan sifat mekanik baja ASTM A36 ini antara lain telah dilampaikan oleh Senthil Kumar *et al*, dengan rangkuman sifat mekanik yang relevan dengan pokok bahasan ini sebagai mana ditunjukkan pada Table 2. Buch (*Buch1962 Se 0.3 Su [24].Pdf*, n.d.) melaporkan bahwa Batas Lelah (σ_f) baja karbon adalah sepertiga dari kekuatan tariknya (σ_u). Hal tersebut berbeda dengan hasil invesigasi oleh Mlikota dan Schmauder (Mlikota & Schmauder, 2020)



(a)



(b)

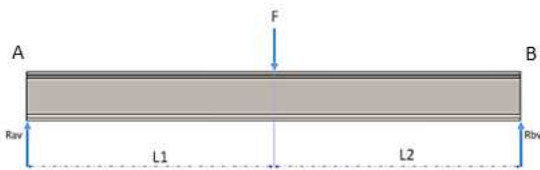
Gambar 8. Struktur mikro baja ASTM A36. (a) Miskrosruktur menunjukkan bentuk butir yang *equiakial* (b) investigasi lanjut struktur mikro memastikan bahwa penebalan garis pada gambar (a) adalah perlit pada batas butir.

Tabel 2: Sifat Mekanik baja ASTM A36 (Sajid &Kiran, 2018b).

Sifat Mekanik	Kekuatan		Modulus Elastisitas
	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	E (GPa)
Nilai	500	250	200

III.2 Kalkulasi Mekanika

Perhitungan momen bending yang diikuti tegangan dan defleksi dengan mengacu pada *ANSI-NDS (National Design Specification for Steel and wood Construction)* (Sowa & Kwiaton, 2017) seperti pada diagram benda bebas berikut dimana batang *girder* menggunakan baja struktur ASTM A36 dengan profil IWF:

Gambar 9. Diagram benda bebas *girder*

Beban yang digunakan diasumsikan berdasarkan beban statik troli dan *hoist*, beban dinamis serta beban tumbukan (*impact*) (Castro et al., 2019) (ASME-NOG-1-2004, 2004; CMAA, 2000; Greiner, 1967)(American Society of Mechanical Engineers.(ASME), 2004). Jarak beban ditetapkan ditengah beam, dengan total Panjang beam 2500mm. Sedangkan beban F sebagaimana ditetapkan pada metoda penelitian adalah sebesar 13734N.

Berikut persamaan untuk menghitung gaya reaksi di titik B yang akan digunakan:

$$\sum M_A = 0 \quad (1)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, diperoleh gaya reaksi sebesar 6867N. Selanjutnya perhitungan nilai momen lentur yang terjadi pada batang dengan menggunakan persamaan berikut:

$$M = R_B \times \frac{1}{2}L \quad (2)$$

Momen lentur yang didapat adalah sebesar $4291,87 \times 10^3$ N.mm. Setelah mendapat momen lentur maka dilanjutkan dengan mencari section *modulus* atau modulus penampang adalah

bentuk geometri yang digunakan untuk mendesain balok atau komponen struktur lentur yang dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$Z_x = \frac{M}{\sigma_b} \quad (3)$$

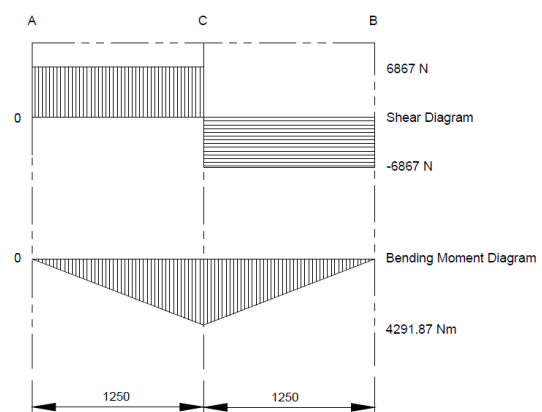
Maka didapat modulus of section sebesar 17167.5 mm^3 . Sehingga profil I beam yang dipilih adalah profil IWF 200x100 dengan nilai *modulus of section* (Z_x)= 184 cm^3 . Maka didapat tegangan maksimum dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma_{max} = \frac{My}{I} \quad (4)$$

Didapat tegangan maksimum sebesar 23,092MPa. Distribusi besaran bending momen menunjukkan model linier sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10. Berbasis pada standar minimum angka keamanan yang dianjurkan sebesar 4, evaluasi terhadap tegangan yang diijinkan bekerja dapat dilakukan melalui persamaan (5) dibawah. Perlu digaris bawahi, faktor keamanan diperoleh jauh lebih besar dari yang dibutuhkan. Hal tersebut untuk memastikan keamanan dari beban yang tidak terduga, cacat material dan memperpanjang umur dari *crane*(Wibawa, 2020).

$$\sigma_{izin} = \frac{\sigma_y}{Sf} \quad (5)$$

Setelah didapat tegangan yang diizinkan sebesar 62,5MPa, dapat dipastikan bahwa tegangan yang terjadi aman karena tegangan yang terjadi hanya sebesar 23,092MPa.



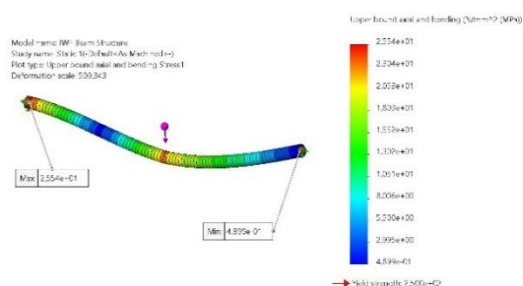
Gambar 10. Diagram Geser dan Momen Batang

Luaran penting dari analisis manual ini diperoleh data angka keamanan (*safety factor - Sf*) sebesar 10,8. Angka kemanan tersebut diperhitungkan berdasarkan batas luluh (*yield strength*) material ASTM A36 sebesar 250 MPa terhadap tegangan maksimum 23,092 MPa.

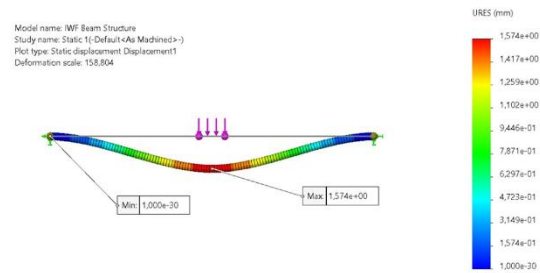
III.3. Analisis CAE Beam

Pada batang *girder* ini dianggap mempunyai pembebanan kritis. Batang akan menopang komponen *hoist* dan beban muatan. Pembebanan pada FEM (*finite element method*) dilakukan tepat dibagian paling ekstrim yaitu ditengah karena mempunyai jarak yang paling jauh dari kedua tumpuan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3a. Simulasi FEM (*finite element method*) dilakukan dengan menetapkan *meshing* sebesar 0,5. Hasil simulasi dengan perlakuan beam menunjukkan adanya tegangan maksimum terletak pada bagian ujung dekat permukaan yang dilakukan *fixture*/tumpuan sebesar 25.54 MPa.

Sedangkan defleksi masimun terjadi pada posisi 1250mm dari tumpuan (pertengahan beam) sebesar 1,5mm. Apabila diperbandingkan dengan perhitungan yang telah dilakukan secara manual, terdapat perbedaan sebesar 2,448MPa, atau sebesar 10,60% lebih tinggi dari perhitungan manual yang telah dilakukan dengan menggunakan model balok sederhana. Disamping itu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11, simulasi ini dapat membuktikan bahwa sebaran bending momen tidaklah linier. Tegangan masimun ini penting untuk diperhatikan saat menentukan resiko dari berbagai kemungkinan termasuk didalamnya potensi patah lelah. Gambar 11 menyajikan distribusi tegangan pada *girder*. Sedangkan *displacement* yang terjadi disampaikan pada Gambar 12.



Gambar 11. Tegangan pada perlakuan beam

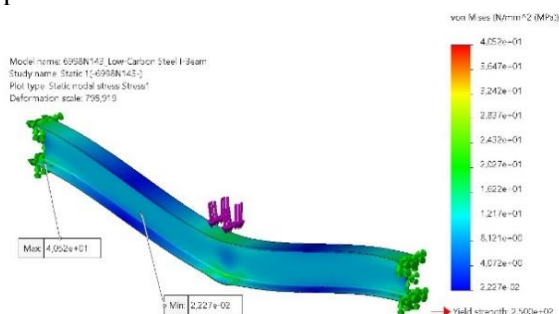


Gambar 12. Displacement pada beam

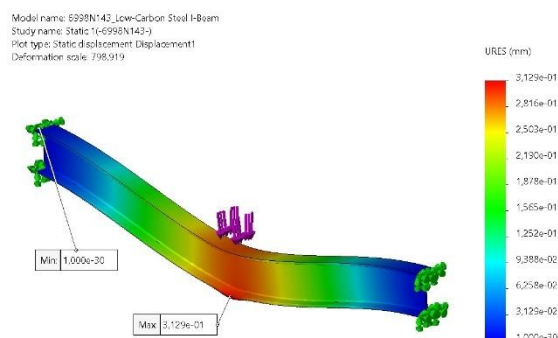
III.4. Analisis CAE Pembebanan Aktual

Pada evaluasi dengan menggunakan CAE pembebanan aktual ini pembebanan dilakukan sebagaimana tercantum pada Gambar 3b. *Meshing* ditetapkan pada 0,5. Beban aktual pada struktur dilakukan pada titik dimana kontak antara troli dan *girder* terjadi. Posisi ini berada di tengah karena mempunyai jarak yang paling jauh dari kedua tumpuan. Hasil dari simulasi pembebanan aktual tegangan maksimum terletak pada bagian ujung dekat permukaan yang dilakukan *fixture*/tumpuan sebesar 40.52MPa seperti ditampilkan pada Gambar 13. Pada pengujian ini diperoleh pula data difleksi masimun sebesar 0,3129mm terjadi pada *flange* bawah tepat di bagian pembebanan aktual.

Dengan demikian diberikan data bahwa perbedaan yang terjadi dari ketiga tersebut diatas adalah akibat adanya model pembebanan yang berbeda. Perbandingan hasil pengukuran tegangan ini dengan metoda sebelumnya didapati deviasi terhadap metoda perhitungan manual dan analisis CAE Beam berturut turut sebesar 17,428 dan 14,98MPa, atau sebesar 75,47% lebih besar dari perhitungan manual dan 58,65% lebih besar dari pada analisis CAE *Beam*. Tegangan terbesar inilah yang harus diwaspadai dari kemungkinan terjadinya patah lelah. Deviasi dan mitigasi patah Lelah didiskusikan secara mendalam pada bagian pembahasan terikut.



Gambar 13. Tegangan pada pembebanan actual



Gambar 14. Displacement pada pembebanan actual.

IV. Pembahasan

Memperhatikan perbedaan hasil yang demikian signifikan, dapat dijelaskan sebagai berikut. Investigasi awal dengan menggunakan perhitungan manual berbasis balok sederhana. Perilaku respon balok terhadap beban menunjukkan distribusi linier diperoleh dengan mempertimbangan struktur yang homogen sepanjang balok (Vu et al., 2022). Pada analisis CAE Beam (Gambar 3.a) dengan *meshing* sebesar 0,5 diperoleh data distribusi tegangan sepanjang beam tidaklah lineier. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan sebelumnya (Wibawa, 2020) Hipotetikal yang masih perlu diungkap lebih mendalam tertuju pada kalkulasi manual balok disaumsikan memiliki struktur yang homogen. Sedangkan data struktur mikro dari penelitian ini sebagaimana di tujukkan pada Gambar 8a dan 8b menunjukkan adanya distribusi perlit pada matriks ferit yang tersebar sepanjang *girder*. Hal penting yang perlu disampaikan bahwa keberadaan fasa perlit ini menjadi salah satu penghambat gerak dislokasi. Struktur mikro inilah yang selanjutnya berkorelasi langsung dengan sifat mekanik A36. Keadaan ini juga terjadi pada analisis dengan pembebanan actual. Berbasis pada kondisi ini dapat diberikan argementasi penyebab distribusi tegangan menjadi tidak linear.

Selanjutnya dengan mencermati posisi beban pada pembebanan actual yang berada pada flange bagian bawah telah menimbulkan tegangan masimum dibagian bawah flange. Untuk itu, evaluasi lanjutan terhadap berbagai kemungkinan kegagalan struktur harus di lakukan dengan lebih cermat. Terhadap kemungkinan patah lelah telah, penelitian ini

telah dilakukan sebagaimana telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya (Weiss et al., 1963)[(Heckel & Christ, 2010)][(Berkovits & Fang, 1993)]. Sebagai evaluasi awal terhadap beban statik dan dengan memperbandingkan dengan kekuatan luluh baja A36 diperoleh besaran angka keamanan sebagaimana tercantum dalam Tabel 3.

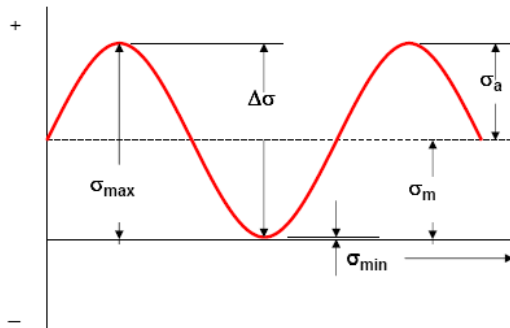
Tabel 3. Analisis Hasil Tegangan

Analisis <i>Girder</i>	Tegangan (MPa)	<i>Faktor keamanan</i> (Sf)
Kalkulasi Mekanika balok sederhana.	23.92	10.8
Simulasi Beam	25.54	9
Simulasi Beban Aktual	40.52	6.1

Meskipun ketiga angka keamanan tersebut masih memenuhi persyaratan, namun pada kasus evaluasi CAE actual harus mendapatkan perhatian khusus. Dalam berbagai area operasi, tidak dapat dihindari adanya kemungkinan kontaminasi atau dampak lingkungan korosif. Hal tersebut perlu mendapatkan perhatian atas munculnya konsentrasi tegangan akibat korosi, terutama korosi antar butir. Disisi lain benturan juga sangat mungkin terjadi, yang dapat menjadi titik awal fenomena kegagalan struktur akibat lelah. Fenomena patah lelah ini dapat terjadi meskipun beban jauh dibawah kekuatan luluh (σ_y) (Weiss et al., 1963) (Heckel & Christ, 2010) (Berkovits & Fang, 1993). Beberapa hal yang harus diperhatikan pada evaluasi kegagalan struktur akibat lelah antara dipengaruhi (i) batas lelah material atau yang bisa di notasikan sebagai σ_f , (ii) amplitudo pembebanan dan (iii) tegangan rata-rata yang merupakan harga pertengahan antara tegangan maksimum dan minimum. Model pembebanan fluktuatif sempurna dapat dicermati pada Gambar 15.

Pada kondisi operasional yang terjadi, proses pengangkatan dan durasi beban tergantung pada jarak antara posisi awal dan posisi akhir peletakan barang. Disisi lain selama proses pemindahan dalam bengkel kerja diasumsikan

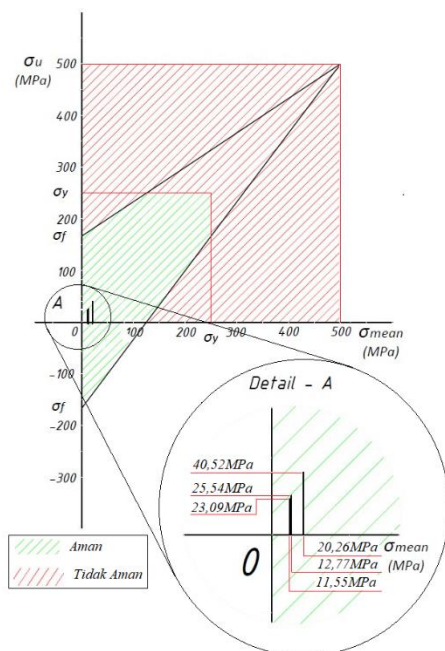
tidak terjadi fluktuasi beban. Ketiadaan fluktuasi tersebut ditopang oleh (i) permukaan lantai yang rata, (ii) roda *gantry crane* yang terbuat dari karet atau bahan lain yang mampu meredam ketidak stabilan beban.



Gambar 15. Peta pembebanan dengan model fluktuasi sempurna

Tegangan rata rata diformulasikan sebagai berikut.

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (6)$$



Gambar 16. Evaluasi resiko kegagalan akibat patah Lelah

Pada kasus ini, dari ketiga metoda analisis tegangan diatas telah diperoleh harga tegangan maksimum berturut turut metoda (i) manual, (ii)

CAE Beam dan (iii) CAE Actual sebesar 23,093, 25,54 dan 40,52MPa. Terkait dengan beban tetap yang merupakan tambahan baik *hoist* serta komponen lain telah diperhitungkan sebagai penambah menjadi beban total. Dengan demikian dapat dipetakan situasi tegangan rata rata (σ_{mean}) yang dihitung menggunakan persamaan (6) adalah 11,55 MPa untuk model analisis manual, 12,77MPa untuk analisis metoda CAE Beam dan 20,26 MPa untuk CAE Pembebanan actual.

Evaluasi lanjutan dengan menggunakan diagram Goodman (Gambar 16) menunjukkan posisi pembebanan berada pada area yang sangat aman.

V. KESIMPULAN

Tegangan yang terjadi pada simulasi *beam* menggunakan aplikasi Solidworkss adalah sebesar 25.54 MPa, sedangkan tegangan yang terjadi pada simulasi pembebanan actual adalah sebesar 40.52 MPa dan pada kalkulasi perhitungan manual tegangan yang terjadi adalah sebesar 23.092. Hal ini terjadi karena pada pembebanan actual beban yang diasumsikan hanya pada sudut kontak pada bagian yang terkena gaya dari troli dengan permukaan kontak yang lebih sedikit. Pada simulasi asumsi beam sendiri, batang *girder* dianggap sebagai beam dengan asumsi gaya yang terjadi pada seluruh bagian profil batang. Hasil dari ketiga simulasi tegangan, *girder* memiliki angka keamanan tinggi dan lebih tinggi dari persyaratan yang berlaku. Hasil simulasi mitigasi resiko akibat beban lelah dinyatakan sangat aman, dengan catatan tidak ada konsentrasi tegangan disepanjang *girder*.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Mechanical Engineers.(ASME). (2004). *ASME NOG-1-2004. Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Multiple Girder)*. ASME.
- Ari, L., & Wibawa, N. (2020). *DESAIN DAN ANALISIS TEGANGAN STRUKTUR CRANE KAPASITAS 10 TON MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA Professional 2017 . Autodesk Inventor merupakan salah satu perangkat lunak pemodelan 3D*. 4(2), 201–210.

- Beham, A., Raggl, S., Karder, J., Werth, B., & Wagner, S. (2022). Dynamic Warehouse Environments for Crane Stacking and Scheduling. *Procedia Computer Science*, 200, 1461–1470. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.347>
- Berkovits, A., & Fang, D. (1993). An analytical master curve for Goodman diagram data. *International Journal of Fatigue*, 15(3), 173–180. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(93\)90174-O](https://doi.org/10.1016/0142-1123(93)90174-O)
- Brian, I., Adi, S., Munir, P. M., Mesin, J. T., Bandung, P. N., & Kunci, K. (2022). Analisis tegangan struktur bridge crane kapasitas 2 ton dengan bantuan software ansys. 13–14. *buch1962 Se 0.3 Su [24].pdf*. (n.d.).
- Castro, J. C., Palafox, E. H., Gómez, L. H. H., Mendoza, G. S., Grijalba, Y. L., & López, P. R. (2019). Analysis of the structural girders of a crane for the license renewal of a BWR Nuclear Power Plant. *Procedia Structural Integrity*, 17, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.016>
- Heckel, T. K., & Christ, H. J. (2010). Low cycle fatigue life threshold for titanium aluminides. *Advanced Engineering Materials*, 12(11), 1142–1145. <https://doi.org/10.1002/adem.201000193>
- Ileš, Š., Lazar, M., Kolonić, F., & Matuško, J. (2015). Stabilizing Model Predictive Control of a Gantry Crane Based on Flexible Set-Membership Constraints. *IFAC-PapersOnLine*, 48(23), 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.291>
- Jaafar, H. I., Mohamed, Z., Jamian, J. J., Abidin, A. F. Z., Kassim, A. M., & Ghani, Z. A. (2013). Dynamic Behaviour of a Nonlinear Gantry Crane System. *Procedia Technology*, 11(Iceei), 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.211>
- Jefriansyah, J., & Ma'ruf, M. (2018). Analisis Struktur Pada Girder Overhead Crane Swl 30 Ton. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 3(1), 43–52. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v3i1.5>
- Karder, J., Beham, A., Werth, B., Wagner, S., & Affenzeller, M. (2022). Integrated Machine Learning in Open-Ended Crane Scheduling: Learning Movement Speeds and Service Times. *Procedia Computer Science*, 200, 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.302>
- Liang, Y., Dong, B., Li, P., Zhang, K., & Gao, X. (2023). Prediction of overwintering crane population in Poyang Lake wetland based on RS and regression Model, China. *Ecological Indicators*, 149(March), 110183. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110183>
- Mlikota, M., & Schmauder, S. (2020). Simulation-based Understanding of the Critical Resolved Shear Stress Relevance for the Fatigue Performance of Metallic Materials. March. <https://doi.org/10.20944/preprints202003.0083.v1>
- Nakamura, J., & Nagayoshi, S. (2022). What can a line of sight tell us? Working with a gantry crane at 50 m above ground level. *Procedia Computer Science*, 207, 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.124>
- Patel, H., Upadhyay, D., & Patel, D. (2020). Design Optimization of Box Girder in Gantry Crane using Finite Element Analysis Software. 1906–1917.
- Sajid, H. U., & Kiran, R. (2018a). Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels. *Construction and Building Materials*, 176, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.018>
- Sajid, H. U., & Kiran, R. (2018b). Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels. *Construction and Building Materials*, 176(May), 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.018>
- Sowa, L., & Kwiaton, P. (2017). Numerical Analysis of Stress Fields Generated in the Gantry Crane Beam. *Procedia Engineering*, 177, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.192>
- Su, J. C., Li, L., Chan, P. W., Zhou, Q. J., & Yang, H. L. (2023). Numerical simulation research on the overturning of gantry

- crane by downbursts. *Heliyon*, 9(8), e18641.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18641>
- Thomas, M., & Sawodny, O. (2020). A model to control self-erecting tower cranes with elastic structure. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8947–8952.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1480>
- V.a. Kopnov. (1999). Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry crane. *Engineering Failure Analysis, Volume 6*, (Issue 3,), 131–141.
[https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(98\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(98)00041-7)
 7.%0A(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630798000417>)
- Vu, M. N., Lobe, A., Beck, F., Weingartshofer, T., Hartl-Nesic, C., & Kugi, A. (2022). Fast trajectory planning and control of a lab-scale 3D gantry crane for a moving target in an environment with obstacles. *Control Engineering Practice*, 126(February).
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105255>
- Weiss, V., Sessler, J., & Packman, P. (1963). Effect of several parameters on low cycle fatigue behavior. *Acta Metallurgica*, 11(7), 809–816.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(63)90020-8)
- Wibawa, L. A. N. (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.
<https://doi.org/10.24912/jmstkik.v4i2.7006>
- Xu, Z., Dong, B., Wei, Z., Lu, Z., Liu, X., & Xu, H. (2023). Study on habitat suitability change and habitat network of rare wintering cranes in important international wetlands. *Ecological Indicators*, 154(July), 110692.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110692>
- Zhang, S., van Dijk, N., & van der Zwaag, S. (2020). A Review of Self-healing Metals: Fundamentals, Design Principles and Performance. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33(9), 1167–1179.