

PERANCANGAN ULANG RANGKA *DEPALLETIZER* UNTUK MENINGKATKAN KEKAKUAN DAN MENURUNKAN TEGANGAN DI PT X

Reno Ade Maulana, Ahmad Saepuddin*

Fakultas Teknik/Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya

*E-mail: ahmadsaepuddin@unesa.ac.id

Abstrak: Struktur rangka *depalletizer* berperan penting dalam menjaga kestabilan gerak sistem selama proses pemindahan material pada lini produksi. Desain rangka eksisting menggunakan profil siku (*open section*) yang memiliki momen inersia dan kekakuan puntir lebih rendah dibandingkan profil tertutup, sehingga berpotensi menghasilkan deformasi besar saat menerima pembebanan operasional. Penelitian ini bertujuan melakukan perancangan ulang struktur rangka *depalletizer* dengan mengganti profil siku menjadi profil hollow (*closed section*) berbahan ASTM A36, serta mengevaluasi kinerja struktural menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Kontribusi utama penelitian ini adalah pembuktian kuantitatif bahwa penggunaan profil hollow mampu meningkatkan kekakuan struktur rangka *depalletizer* secara signifikan, dengan penurunan *displacement* maksimum sebesar 79,97%, dari 2,86 mm menjadi 0,573 mm pada kondisi paling kritis dan penurunan tegangan von Mises sebesar 29,13%, dari 162 MPa menjadi 114,817 MPa, serta *safety factor* meningkat dari 1,54 menjadi minimal 2,18. Analisis *fatigue* menunjukkan bahwa desain hasil perancangan ulang mencapai total *life* sebesar 1.000.000 siklus, meningkat signifikan sebesar 26,6% dibandingkan desain eksisting yang memiliki total *life* minimum 790.075,8 siklus. Pada seluruh variasi pembebanan, nilai *displacement* berada di bawah batas kritis 1,0 mm dan *safety factor* minimum di atas 1,5, sehingga memenuhi kriteria kekakuan dan keamanan operasional. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan profil hollow memberikan implikasi desain berupa peningkatan kekakuan struktur, penyederhanaan konfigurasi rangka, pengurangan jumlah sambungan las, serta peningkatan keandalan dan stabilitas sistem *depalletizer* secara umum.

Kata Kunci: Struktur Rangka *Depalletizer*, Tegangan von Mises, Profil Hollow, *Finite Element Analysis* (FEA)

Abstract: The *depalletizer* frame structure plays a crucial role in maintaining system motion stability during material handling processes in production lines. The existing frame design utilizes angle steel (*open section*), which has lower moment of inertia and torsional stiffness compared to closed sections, making it prone to larger deformation under operational loading. This study aims to redesign the *depalletizer* frame structure by replacing the angle section with a hollow (*closed section*) profile made of ASTM A36 steel and to evaluate its structural performance using *Finite Element Analysis* (FEA). The main contribution of this study is the quantitative demonstration that the use of hollow sections significantly improves the structural stiffness of the *depalletizer* frame. The results show a reduction in maximum displacement of 79.97%, from 2.86 mm to 0.573 mm under the most critical loading condition, and a reduction in von Mises stress of 29.13%, from 162 MPa to 114.817 MPa. In addition, the safety factor increases from 1.54 to a minimum of 2.18. Fatigue analysis indicates that the redesigned structure achieves a total life of 1,000,000 cycles, representing a significant improvement of 26.6% compared to the existing design, which has a minimum total life of 790,075.8 cycles. For all loading variations, the displacement values remain below the critical limit of 1.0 mm and the minimum safety factor exceeds 1.5, indicating that the redesigned structure satisfies the required stiffness and operational safety criteria. These findings demonstrate that the use of hollow sections provides design advantages in terms of increased structural stiffness, simplified frame configuration, reduced number of welded joints, and improved reliability and stability of *depalletizer* systems.

Keywords: *Depalletizer* Frame Structure, Von Mises Stress, Hollow Profile Frame, *Finite Element Analysis* (FEA)

PENDAHULUAN

Depalletizer merupakan suatu sistem otomasi yang berfungsi memindahkan unit dari palet atau meja untuk kemudian ditempatkan ke tahapan proses selanjutnya, seperti konveyor (Buongiorno dkk., 2022). Selain itu, penggunaan *depalletizer* yang optimal dapat mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual, mempercepat aliran produksi, mengendalikan kualitas, dan mendorong peningkatan produktivitas perusahaan (Pratiwi dkk., 2025; Susanti dkk., 2021). Sehubungan tuntutan kinerja tersebut, struktur rangka (*frame*) *depalletizer* berperan sebagai elemen utama yang menopang seluruh komponen mekanis, sistem penggerak, dan beban kerja selama operasi. Pada desain eksisting di PT. X, rangka *depalletizer* menggunakan profil siku (*angle*

steel) berpenampang terbuka. Penggunaan profil tersebut cenderung memerlukan banyak penambahan *gusset plate* untuk meningkatkan kekakuan struktur. Geometri tersebut menyebabkan peningkatan jumlah sambungan las, kompleksitas fabrikasi, dan keterbatasan akses perawatan, akibatnya dapat meningkatkan kerentanan terhadap korosi, terutama pada area las sambungan *gusset plate* yang secara mikrostruktur memiliki ketahanan korosi lebih rendah dibanding logam dasar (Rifai dkk., 2024; Zgonnik dkk., 2022). Oleh karena itu, desain rangka eksisting memerlukan *maintenance* lebih untuk mencegah percepatan korosi.

Evaluasi awal terhadap kinerja struktur rangka depalletizer eksisting menunjukkan bahwa tingkat kekakuannya belum optimal dalam menahan beban kerja aktual. Karakteristik penampang terbuka pada profil siku menyebabkan momen inersia dan kekakuan puntir lebih rendah dibandingkan profil tertutup, sehingga struktur lebih rentan mengalami deformasi (Yue dkk., 2022). Kondisi tersebut menyebabkan nilai *displacement* yang lebih besar pada saat menerima pembebanan kerja, sehingga berpotensi menurunkan stabilitas gerak sistem *depalletizer* yang memerlukan kekakuan tinggi untuk menjaga presisi posisi. Kebutuhan kekakuan menjadi penting karena sistem pemandu menggunakan *cam follower* dan *LM guideway*, sehingga toleransi deformasi rangka harus kecil agar tidak mempengaruhi stabilitas gerak (Merticaru dkk., 2023). Selain itu, geometri struktur yang kompleks dan rendahnya kekakuan rangka juga berpengaruh terhadap peningkatan tegangan pada beberapa titik kritis, sehingga nilai tegangan ekuivalen (*von Mises stress*) menjadi lebih tinggi dan menghasilkan margin keamanan desain yang relatif terbatas.

Beberapa penelitian terdahulu menegaskan bahwa desain struktur rangka yang kokoh dan pemilihan profil material berperan penting terhadap stabilitas, ketahanan pembebanan, serta efisiensi operasional (Zaccaria dkk., 2021). Berdasarkan penelitian oleh Kureshi & Desai (2017) menunjukkan bahwa penggunaan *closed hollow steel section* pada struktur rangka menghasilkan defleksi dan tegangan lebih rendah serta mengurangi jumlah sambungan dibandingkan profil terbuka. Selain itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kumar dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan profil hollow pada struktur menara listrik menghasilkan kekakuan lebih tinggi, kapasitas menahan beban lebih baik, serta berat yang lebih ringan dibandingkan profil siku. Namun, penelitian sebelumnya berfokus pada struktur bangunan, jembatan, dan menara, sehingga belum membahas struktur rangka untuk mesin *depalletizer*. Temuan serupa dilaporkan oleh Nora dkk. (2015) pada struktur baja secara umum, yang menunjukkan bahwa *tubular section* memiliki kekakuan torsional dan efisiensi material yang lebih baik dibandingkan profil siku konvensional.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut memiliki kesamaan keterbatasan fundamental yang membedakannya dari konteks penelitian ini, meliputi seluruhnya berfokus pada aplikasi struktur sipil stasioner (jembatan, menara transmisi, struktur baja umum) dengan beban dominan statis dan tidak berpindah posisi. Secara spesifik, belum terdapat penelitian yang mempertimbangkan distribusi beban sepanjang lintasan horizontal yang merepresentasikan kondisi operasional aktual mesin *depalletizer*, serta kajian yang mengintegrasikan sistem pemandu presisi seperti *cam follower* dan *LM guideway* sebagai kriteria utama perancangan. Lebih lanjut, penelitian yang secara eksplisit mengkaji ketahanan fatigue rangka *depalletizer* akibat beban siklus operasional. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi pengaruh penggantian profil siku menjadi profil hollow terhadap kinerja struktural rangka mesin *depalletizer*, dengan mempertimbangkan variasi posisi pembebanan sepanjang lintasan horizontal 2500 mm yang merepresentasikan kondisi operasional aktual, serta integrasi sistem pemandu *cam follower* dan *LM guideway* yang menuntut toleransi deformasi yang rendah.

Berdasarkan kompleksitas geometri struktur rangka *depalletizer* pada desain eksisting, serta kebutuhan akan kekakuan struktur yang tinggi untuk menjaga kestabilan gerak sistem, diperlukan perancangan ulang pada konfigurasi rangka. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan ulang struktur rangka *depalletizer* dengan mengganti profil rangka dari profil siku menjadi profil hollow, dan mengevaluasi peningkatan kekakuan dan penurunan tegangan ekuivalen (*von Mises stress*) menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), sekaligus membandingkan performa ketahanan *fatigue* antara desain eksisting dan desain hasil perancangan ulang. Dengan perancangan ulang tersebut, sistem *depalletizer* diharapkan memiliki keandalan yang lebih tinggi serta stabilitas gerak yang lebih baik untuk mendukung proses produksi pada jalur produksi *leaf spring* di PT. X. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam menunjukkan pengaruh penggantian profil siku dengan profil hollow terhadap peningkatan kekakuan dan

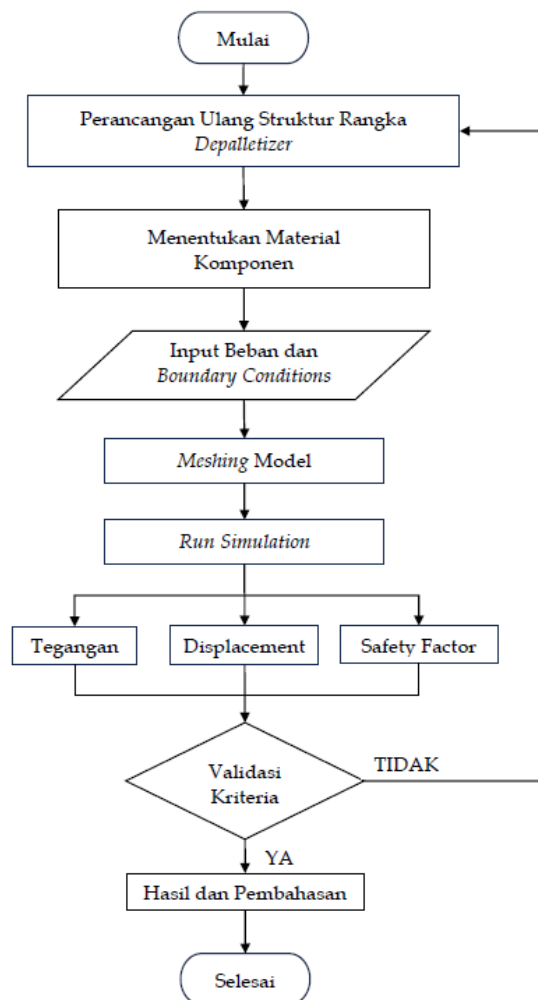
penurunan tegangan pada rangka *depalletizer*, sehingga temuan ini dapat dijadikan acuan desain bagi perancang sistem *depalletizer* industri secara umum yang menuntut kekakuan struktural tinggi.

METODE

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini meliputi pemodelan tiga dimensi menggunakan *software* SolidWorks dengan fokus pada perancangan ulang yang menggunakan profil hollow dengan material ASTM A36. Analisis dilakukan menggunakan SolidWorks Simulation untuk mengevaluasi respons mekanis struktur rangka. Parameter yang digunakan dalam analisis meliputi tegangan ekuivalen (*von Mises stress*), *displacement* dan *safety factor*. Selain itu, dilakukan pula analisis *fatigue* pada posisi pembebanan paling kritis untuk kedua desain. Batas aman material dengan nilai *safety factor* minimum ditetapkan sebesar 1,5. Nilai ini dipilih karena mempertimbangkan adanya beban kejut ringan dan getaran selama proses *start-stop depalletizer* (Budynas & Keith, 2014). Batas *displacement* maksimum ditetapkan 1,0 mm untuk menjaga kekakuan dan stabilitas sistem pemandu *cam follower* dan *LM guideway* selama operasi (Macharia & Kohiro, 2025).

Tabel 1. Sifat Material ASTM A36

Spesifikasi	Unit
<i>Elastic Modulus</i>	200000 N/mm ² (200 GPa)
<i>Mass Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Tensile Strength</i>	400 N/mm ² (400 MPa)
<i>Yield Strength</i>	250 N/mm ² (250 MPa)
<i>Poissons Ratio</i>	0.260



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Asumsi Simulasi

Simulasi FEA pada penelitian ini dilakukan dengan beberapa asumsi utama sebagai berikut:

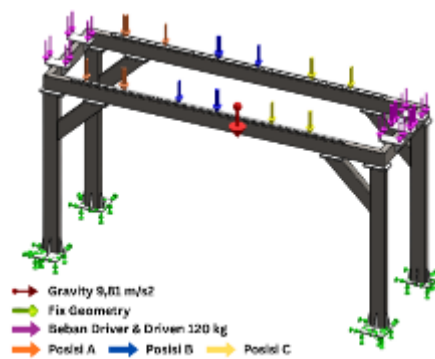
1. Analisis dilakukan dalam kondisi statik linier, sehingga tidak memperhitungkan efek dinamik seperti beban impak atau getaran secara langsung pada analisis statis.
2. Material diasumsikan homogen, isotropik, dan mengikuti hukum Hooke (perilaku elastis linear), sesuai dengan karakteristik baja ASTM A36 pada tegangan di bawah *yield strength*.
3. Seluruh sambungan antar komponen rangka diasumsikan sebagai sambungan kaku (*rigid joint*), yang mewakili kondisi sambungan las penuh.
4. Beban yang digunakan adalah beban statis (*static load*) sebesar 1000 kg, merepresentasikan berat komponen pengangkat beserta material yang diangkat pada kondisi pembebanan operasional normal.
5. Analisis *fatigue* dilakukan menggunakan pendekatan *stress-life* (S-N curve) berdasarkan hasil tegangan *von Mises* dari analisis statik.

Boundary Conditions

Boundary conditions pada analisis struktur rangka *depalletizer* ditunjukkan pada Gambar 2. Tumpuan (*fixed support*) diterapkan pada keempat titik kaki rangka yang berkontak dengan lantai, merepresentasikan kondisi rangka yang dikunci secara kaku menggunakan baut angkur pada struktur bangunan. Gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$ diterapkan pada seluruh komponen model untuk memperhitungkan berat sendiri struktur. Beban penggerak/transmisi daya (*driver & driven*) sebesar 120 kg diterapkan sebagai beban konstan, sedangkan beban komponen pengangkat sebesar 1000 kg diterapkan sebagai bervariasi posisinya. Variasi yang dianalisis adalah posisi pembebanan berdasarkan lintasan aktual pergerakan mesin secara horizontal yang memiliki panjang langkah 2500 mm, yaitu:

1. Posisi A, merepresentasikan kondisi beban berada di batas kiri lintasan.
2. Posisi B, merepresentasikan kondisi beban berada di tengah lintasan.
3. Posisi C, merepresentasikan kondisi beban berada di ujung lintasan lainnya.

Analisis *fatigue* dilakukan khusus pada kondisi pembebanan paling kritis berdasarkan hasil analisis statik untuk kedua desain, pembebanan direpresentasikan sebagai fluktuasi amplitudo tegangan, sehingga perbandingan ketahanan *fatigue* dapat dilakukan pada kondisi yang setara dan paling representatif.



Gambar 2. *Boundary Conditions*

Meshing

Pemodelan *mesh* dilakukan dengan menggunakan metode *blended curvature-based mesh* karena pemodelan ini menghasilkan distribusi tegangan yang efisien dari pada metode lain (Muhajir dkk., 2025) dengan hasil uji independensi *mesh* sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Independensi *Mesh*

Ukuran Elemen	Jumlah Elemen	<i>Von Mises Stress</i>	<i>Displacement</i>
8 mm	2141030	110,08 MPa	0,5720 mm
7 mm	2918808	114,09 MPa	0,5724 mm
6 mm	4174034	114,82 MPa	0,5734 mm
5 mm	8903185	115,40 MPa	0,5740 mm

Hasil menunjukkan bahwa perubahan tegangan maksimum dari ukuran 7 mm ke 6 mm sebesar 0,63% dan dari ukuran 6 mm ke 5 mm sebesar 0,5%. Karena perubahan berada dibawah

toleransi 1% maka hasil dinyatakan telah mencapai kondisi konvergen (Patil & Jeyakarthykayan, 2018). Dengan mempertimbangkan efisiensi komputasi dan stabilitas hasil, ukuran elemen global dipilih 6 mm sebagai *mesh* optimal dengan jumlah elemen *mesh* yang dihasilkan 4.174.034 elemen.

Validasi Simulasi

Validasi hasil simulasi FEA dilakukan melalui dua pendekatan. Pertama, validasi numerik dilakukan melalui uji independensi *mesh* yang menunjukkan konvergensi hasil dengan perubahan di bawah 1%, sehingga memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada resolusi diskretisasi, sesuai dengan kriteria konvergensi standar (Patil & Jeyakarthykayan, 2018). Kedua, validasi konseptual dilakukan dengan membandingkan tren hasil simulasi terhadap teori mekanika material serta temuan penelitian terdahulu. Ketiga, dilakukan verifikasi numerik defleksi dengan perhitungan analitik balok sederhana pada balok horizontal sebagai komponen kritis struktur (Erbaş & Alyavuz, 2022).

Validasi numerik dengan perhitungan analitik balok sederhana pada balok horizontal sebagai komponen kritis struktur. Balok dimodelkan sebagai balok sederhana (*simply supported beam*) dengan bentang efektif $L = 2650$ mm, yaitu jarak antara titik pertemuan diagonal bracing 45° yang secara efektif bekerja sebagai tumpuan pengaku. Penampang hollow $200 \times 100 \times 5$ mm berbahan ASTM A36 memiliki momen inersia $I = 15,224 \times 10^6$ mm⁴ dan *section modulus* $S = 152.242$ mm³. Karena beban terdistribusi merata, diterapkan beban merata $w = 7,9113$ N/mm pada segmen 620 mm di tengah bentang (setara 500 kg per balok).

Defleksi maksimum di tengah bentang dihitung menggunakan prinsip superposisi dari rumus defleksi beban titik pada balok sederhana dengan beban terpusat di posisi sembarang dari tumpuan (Budynas & Keith, 2014).

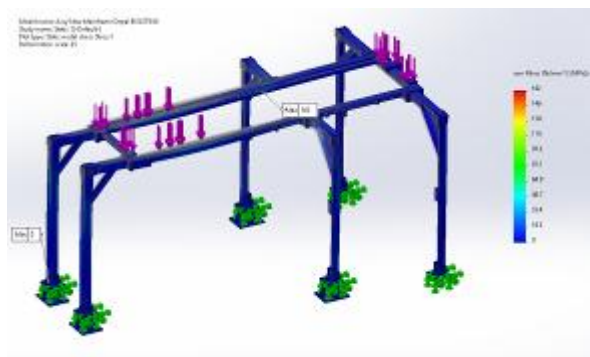
$$\delta_{tengah} = \frac{Fa(3L^2 - 4a^2)}{48EI}$$

HASIL DAN DISKUSI

Hasil simulasi dilakukan evaluasi yang difokuskan pada distribusi *von Mises stress*, total *displacement*, *safety factor* dan analisis *fatigue* pada kondisi pembebanan paling kritis.

Hasil Simulasi Desain Eksisting

Analisis struktur pada desain rangka *depalletizer* eksisting dilakukan sebagai kondisi pembanding untuk mengetahui tingkat kinerja awal sebelum perancangan ulang. Berdasarkan evaluasi FEA, distribusi *von Mises stress* maksimum pada struktur eksisting mencapai 162 MPa (gambar 3). Total *displacement* maksimum sebesar 2,86 mm, menandakan lendutan yang signifikan di atas batas kriteria 1,0 mm. *Safety factor* minimum sebesar 1,54 menunjukkan margin keamanan yang sangat terbatas, hanya 2,7% di atas batas minimum operasional 1,5. Hasil simulasi *fatigue* menunjukkan bahwa total *life* minimum pada struktur rangka eksisting adalah 790.075,8 siklus.



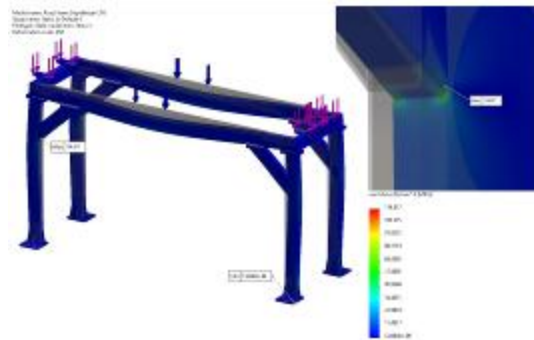
Gambar 3. Maksimum *von Mises Stress* Desain Eksisting

Hasil Simulasi Desain Hasil Perancangan Ulang

Hasil simulasi FEA divalidasi dengan hasil perhitungan defleksi secara analitik pada posisi pembebanan paling kritis (Posisi B). Hasil perhitungan analitik memberikan defleksi maksimum

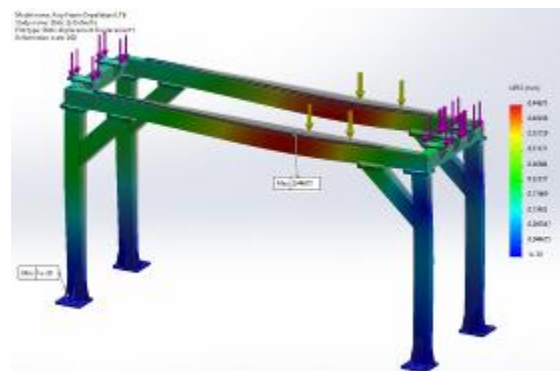
sebesar 0,6085 mm, sedangkan hasil simulasi FEA sebesar 0,573 mm. Selisih defleksi antara kedua pendekatan sebesar 6,19% terhadap nilai FEA berada dalam rentang yang dapat diterima untuk verifikasi FEA, di mana selisih di bawah 15% umumnya dianggap sebagai validasi yang kuat (Al-Qasem dkk., 2018; Handayani dkk., 2013).

Hasil simulasi FEA pada desain hasil perancangan ulang menunjukkan bahwa nilai *von Mises stress* maksimum terjadi pada posisi B sebesar 114,817 MPa (gambar 4), yang merupakan kondisi pembebanan paling kritis. Pada posisi A dan C, nilai tegangan maksimum masing-masing sebesar 83,304 MPa dan 102,849 MPa. Dibandingkan dengan desain eksisting yang memiliki tegangan maksimum sebesar 162 MPa.



Gambar 4. Hasil *von Mises Stress* di Posisi B

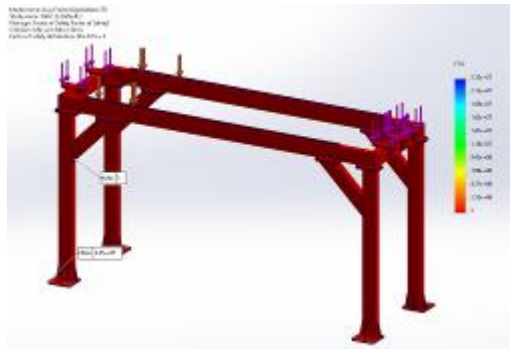
Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *displacement* maksimum pada desain hasil perancangan ulang terjadi pada posisi B sebesar 0,573 mm. Pada posisi C dan A, masing-masing diperoleh nilai *displacement* sebesar 0,446 mm dan 0,316 mm. Seluruh nilai *displacement* berada di bawah batas kriteria 1,0 mm.



Gambar 5. Hasil *Displacement* di Posisi C

Hasil evaluasi *safety factor* (FoS) menunjukkan bahwa nilai minimum tertinggi terjadi pada posisi A sebesar 3,0 (gambar 6), diikuti oleh posisi C sebesar 2,43, dan posisi B sebagai kondisi paling kritis dengan nilai minimum sebesar 2,18. Seluruh nilai *safety factor* berada di atas batas minimum yang ditetapkan yaitu 1,5.

Analisis *fatigue* pada desain hasil perancangan ulang dilakukan pada posisi B (gambar 7), yaitu pada posisi beban paling kritis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa total *life* minimum struktur hasil perancangan ulang pada posisi B adalah 1.000.000 siklus. Nilai total *life* tersebut menunjukkan bahwa struktur rangka tidak mengindikasikan kegagalan dalam rentang siklus yang dianalisis.



Gambar 6. Hasil *Safety Factor* di Posisi A



Gambar 7. Hasil Analisis Fatigue (*Total Life*) di Posisi B

Hasil analisis struktur rangka *depalletizer* seperti yang ditunjukkan Tabel 3, untuk membandingkan respons struktur pada desain eksisting dan hasil perancangan ulang dengan variasi posisi pembebanan A, B, C, berdasarkan *von Mises stress* maksimum, total *displacement* maksimum, dan nilai *safety factor* minimum.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Analisis Statis

Kondisi Struktur	<i>Von Mises Stress</i>	<i>Displacement</i>	<i>Safety Factor</i>
Eksisting	162,000 MPa	2,860 mm	1,54
Posisi A	83,3040 MPa	0,316 mm	3,00
Posisi B	114,817 MPa	0,573 mm	2,18
Posisi C	102,849 MPa	0,446 mm	2,43

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisis Fatigue

Parameter	Desain Eksisting	Desain Perancangan Ulang
Total <i>Life</i> Minimum (Siklus)	790.075,8	1.000.000
Peningkatan Total <i>Life</i> (%)	-	26,6

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa respons struktural rangka *depalletizer* sangat dipengaruhi oleh posisi pembebanan serta karakteristik penampang yang digunakan. Pada desain hasil perancangan ulang, posisi pembebanan B menghasilkan kondisi paling kritis dengan nilai *von Mises stress* maksimum sebesar 114,817 MPa dan *displacement* sebesar 0,573 mm, sedangkan posisi A dan C menunjukkan nilai yang lebih rendah, masing-masing sebesar 83,3040 MPa dan 102,849 MPa untuk *von Mises stress*, serta 0,316 mm dan 0,446 mm untuk *displacement*. Pola ini konsisten dengan teori mekanika struktur, dimana peningkatan jarak pembebanan terhadap tumpuan akan meningkatkan momen lentur sehingga menyebabkan peningkatan tegangan dan deformasi (McKinstry dkk., 2015; Sitanggang & Manurung, 2025). Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi pada area sambungan antara kolom dan elemen diagonal yang berfungsi sebagai jalur utama transfer beban, sehingga mengalami distribusi tegangan yang lebih besar dibandingkan elemen lainnya (Prastianto dkk., 2024).

Dibandingkan dengan desain eksisting, terjadi penurunan tegangan maksimum dari 162 MPa menjadi 114,817 MPa, serta penurunan *displacement* dari 2,86 mm menjadi 0,573 mm pada kondisi paling kritis. Peningkatan kinerja struktural pada desain hasil perancangan ulang terjadi karena perbedaan fundamental sifat penampang antara profil siku (*open section*) dan profil hollow (*closed section*). Profil siku memiliki sumbu netral yang terletak di dekat tepi penampang, sehingga momen inersia relatif kecil untuk luas penampang yang sama. Sebaliknya, profil hollow mendistribusikan material lebih jauh dari sumbu netral sehingga menghasilkan momen inersia yang secara signifikan lebih besar, yang secara langsung meningkatkan kekakuan lentur. Karena kekakuan lentur berbanding lurus dengan momen inersia, profil hollow secara inheren menghasilkan defleksi yang lebih kecil di bawah beban yang sama (Supriyanto & Yunianto, 2016). Selain itu, profil hollow memiliki kekakuan puntir yang jauh lebih tinggi karena penampang tertutup menghasilkan aliran geser yang kontinu, sedangkan profil siku rentan terhadap tekukan-puntir akibat kekakuan *warping* yang rendah. Distribusi tegangan yang lebih merata pada profil hollow juga mengurangi konsentrasi tegangan pada sudut penampang dan area sambungan *gusset plate* yang menjadi titik lemah pada desain eksisting. Hal ini konsisten dengan penelitian Kureshi & Desai (2017) yang menunjukkan penurunan defleksi pada rangka jembatan pejalan kaki dan Kumar dkk. (2023) pada menara transmisi, sehingga penelitian ini memperluas validitas temuan tersebut ke domain baru, yaitu struktur mesin *depalletizer* dengan beban dan sistem pemandu presisi.

Hasil analisis *fatigue* memberikan gambaran terhadap ketahanan jangka panjang kedua desain. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan pembebanan ekuivalen pada kondisi paling kritis, sehingga hasil yang diperoleh bersifat konservatif terhadap kondisi aktual. Desain eksisting menunjukkan total *life* minimum sebesar 790.075,8 siklus, yang relatif rendah mengingat sistem *depalletizer* beroperasi secara kontinu, sehingga berpotensi mengalami inisiasi retak pada area sambungan. Sebaliknya, desain hasil perancangan ulang mencapai total *life* sebesar 1.000.000 siklus yang menunjukkan bahwa struktur rangka tidak mengindikasikan kegagalan dalam rentang siklus yang dianalisis, meningkat sebesar 26,6% dibandingkan desain eksisting. Peningkatan ini menunjukkan kontribusi profil hollow dalam meningkatkan ketahanan *fatigue*, yang dipengaruhi oleh penurunan tegangan maksimum sebesar 29,13% serta distribusi tegangan yang lebih merata, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan dan risiko inisiasi retak (Budynas & Keith, 2014). Berdasarkan kurva S-N material baja, penurunan amplitudo tegangan pada tingkat ini berkorelasi langsung dengan peningkatan umur *fatigue* yang signifikan, konsisten dengan hasil simulasi yang diperoleh.

Secara keseluruhan, penggunaan profil hollow dalam penelitian ini terbukti mampu menurunkan *displacement* hingga sekitar 79,97%, menurunkan tegangan maksimum sebesar 29,13%, serta meningkatkan *safety factor* dari 1,54 menjadi minimal 2,18, serta meningkatkan total *life fatigue* sebesar 26,6% dari 790.075,8 siklus menjadi 1.000.000 siklus, yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam kekakuan dan kekuatan struktur dibandingkan desain eksisting. Peningkatan *safety factor* menunjukkan bahwa struktur bekerja pada tingkat tegangan yang lebih rendah terhadap batas material, sehingga memiliki margin keamanan yang lebih tinggi terhadap kegagalan (Budynas & Keith, 2014). Rasio *displacement* antara posisi B dan A mencapai 1,81 kali, serta antara posisi B dan C sebesar 1,28 kali, yang menegaskan bahwa posisi pembebanan merupakan variabel dominan dalam menentukan respons struktural.

Meskipun analisis sensitivitas parameter tidak dilakukan secara eksplisit, hasil simulasi memberikan dasar evaluasi terhadap parameter desain yang paling berpengaruh. Momen inersia penampang merupakan parameter paling sensitif karena kekakuan lentur berbanding lurus dengan hasil kali modulus elastisitas dan momen inersia. Pada profil hollow, momen inersia berbanding dengan selisih pangkat empat dimensi luar dan dimensi dalam, sehingga peningkatan dimensi luar sebesar 10% dapat meningkatkan momen inersia hingga sekitar 46% dan menurunkan *displacement* secara proporsional. Panjang bentang lintasan sebesar 2500 mm juga merupakan parameter sensitif karena defleksi maksimum pada balok sederhana berbanding dengan pangkat tiga panjang bentang, yang menjelaskan mengapa penurunan *displacement* pada penelitian ini mencapai 79,97%, lebih besar dibandingkan studi pada struktur bangunan yang umumnya memiliki rasio bentang-ketinggian lebih kecil.

Secara praktis, penggunaan profil hollow memungkinkan penyederhanaan konfigurasi rangka melalui pengurangan kebutuhan *gusset plate* dan jumlah sambungan las, sehingga menurunkan kompleksitas fabrikasi dan mengurangi distorsi akibat pengelasan. Konfigurasi penampang yang

tertutup juga mengurangi area rawan korosi dengan mengeliminasi celah pada sambungan *gusset plate* yang secara mikrostruktur memiliki ketahanan korosi lebih rendah dibandingkan logam dasar, sehingga berpotensi menurunkan frekuensi dan biaya *maintenance* jangka panjang (Rifai dkk., 2024). Identifikasi posisi pembebanan paling kritis pada tengah lintasan juga memberikan panduan operasional bahwa sistem kontrol *depalletizer* perlu mengatur kecepatan dan percepatan pada zona tersebut untuk meminimalkan beban dinamik tambahan. Untuk aplikasi rangka *depalletizer* yang mengintegrasikan sistem pemandu presisi seperti *cam follower* dan *LM guideway* dengan toleransi deformasi ketat, penggunaan profil hollow berbahan ASTM A36 direkomendasikan sebagai alternatif pengganti profil siku, dengan pemilihan dimensi penampang yang mempertimbangkan kriteria *von Mises stress*, *displacement*, *safety factor* minimum, serta ketahanan *fatigue* yang lebih tinggi sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian ini.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan statis ekuivalen sehingga belum mempertimbangkan efek pembebanan dinamik, dampak dan getaran. Hal ini dikarenakan fokus utama penelitian adalah pada evaluasi peningkatan kekakuan struktur serta penurunan tegangan sebagai parameter dasar dalam perancangan ulang rangka, sehingga pendekatan statis dianggap representatif untuk menggambarkan kondisi pembebanan maksimum. Analisis *fatigue* yang dilakukan menggunakan pendekatan *stress-life* berbasis kurva S-N belum mempertimbangkan pengaruh kualitas sambungan las terhadap ketahanan *fatigue*. Validasi eksperimental terhadap hasil simulasi *fatigue* juga belum dilakukan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang mencakup analisis dinamik serta validasi eksperimental diperlukan untuk memperoleh desain yang lebih komprehensif dan optimal.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis struktur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Perancangan ulang struktur rangka *depalletizer* dengan mengganti profil siku menjadi profil hollow terbukti mampu meningkatkan kekakuan struktur secara signifikan. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan *displacement* maksimum sebesar 79,97%, dari 2,86 mm pada desain eksisting menjadi 0,573 mm pada kondisi pembebanan paling kritis. Selain itu, nilai *displacement* pada seluruh variasi pembebanan berada di bawah batas kriteria 1,0 mm, sehingga menunjukkan bahwa struktur hasil perancangan ulang memenuhi kebutuhan kekakuan untuk menjaga stabilitas sistem. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan profil hollow lebih efektif dalam mengendalikan deformasi struktur dibandingkan profil siku pada aplikasi *depalletizer*.
2. Hasil evaluasi kinerja struktural menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) menunjukkan bahwa desain hasil perancangan ulang memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan desain eksisting. Tegangan ekuivalen (*von Mises stress*) maksimum menurun dari 162 MPa menjadi 114,817 MPa, sedangkan nilai *safety factor* meningkat dari 1,54 menjadi minimal 2,18 pada seluruh variasi pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa struktur hasil perancangan ulang memiliki distribusi tegangan yang lebih baik serta margin keamanan yang lebih tinggi terhadap kegagalan. Dengan demikian, penggunaan profil hollow tidak hanya meningkatkan kekakuan, tetapi juga meningkatkan keandalan struktur rangka *depalletizer* dalam kondisi operasional.
3. Analisis *fatigue* pada kondisi pembebanan paling kritis menunjukkan bahwa desain hasil perancangan ulang mencapai total *life* sebesar 1.000.000 siklus, sehingga meningkat sebesar 26,6% dibandingkan desain eksisting yang hanya mencapai 790.075,8 siklus. Peningkatan total *life* ini mengkonfirmasi bahwa penggunaan profil hollow tidak hanya meningkatkan kekakuan dan keamanan struktural, tetapi juga secara signifikan meningkatkan ketahanan *fatigue* dan umur pakai jangka panjang rangka *depalletizer* dalam kondisi pembebanan operasional berulang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing atas arahan, bimbingan ilmiah, serta masukan konstruktif yang diberikan selama proses penelitian dan penyusunan artikel ini. Bimbingan yang sistematis dan diskusi yang mendalam sangat berperan dalam penyempurnaan metodologi, analisis, serta penyajian hasil penelitian. Selain itu, ucapan terima kasih kepada pihak PT. X yang telah memberikan izin penelitian, dukungan teknis, serta akses terhadap data dan fasilitas yang diperlukan.

DAFTAR RUJUKAN

- Al-Qasem, I., Rasem Hasan, A., Abdulwahid, M., & Galobardes, I. (2018). Comparison between Analytical Equation and Numerical Methods for Determining Shear Stress in a Cantilever Beam. *Civil Engineering Journal*, 4(2), 258–265. <https://doi.org/10.28991/cej-030989>
- Budynas, R. G., & Keith, J. (2014). *Shigley's Mechanical Engineering Design 10th Edition*.
- Buongiorno, D., Caramia, D., Di Ruscio, L., Longo, N., Panicucci, S., Di Stefano, G., Bevilacqua, V., & Brunetti, A. (2022). Object Detection for Industrial Applications: Training Strategies for AI-Based Depalletizer. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/app122211581>
- Erbaş, Y., & Alyavuz, B. (2022). *Comparison Of Analytical And Finite Element Solutions Of Low Velocity Impact Problem for Simply Supported Beam*.
- Handayani, T., Irawadi Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur -BPPT Kawasan Puspiptek Serpong, Y., & -Tangerang, S. (2013). *Analisis Lendutan Balok Beton Secara Eksperimental dan Metode Elemen Hingga Sesuai SNI 2847 : 2013 (Tri Handayani, Yudi Irawadi) Analisis Lendutan Balok Beton Secara Eksperimental Dan Metode Elemen Hingga Sesuai Sni 2847 : 2013 Analysis Of Concrete Beam Deflection By Experimentally And Finite Element Method Based On Sni 2847: 2013*.
- Kumar, R., Hooda, Y., & Ranjan, R. (2023). Comparative analysis of transmission line towers for angle section and square hollow section structural configuration in Indian context. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.405>
- Kureshi, S., & Desai, H. (2017). Review of Comparison Between Closed Hollow Steel Section and Conventional Steel Section for Foot Over Bridge with Different Truss Configuration. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4(11).
- Macharia, S., & Kohiro, J. (2025, November 23). *SiliconWit | SiliconWit*. <https://siliconwit.com/ja/education/mechanics-of-materials/beam-deflections-stiffness-analysis/>
- McKinstry, R., Lim, J. B. P., Tanyimboh, T. T., Phan, D. T., & Sha, W. (2015). Optimal design of long-span steel portal frames using fabricated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.10.010>
- Merticaru, E., Merticaru, V., Nagiț, G., Mihalache, A. M., Tăbăcaru, L. L., & Rîpanu, M. I. (2023). Analytical, Numerical and Experimental Analysis of a Positive Displacement Cam Mechanism—A Case Study. *Machines*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/machines11070770>
- Nora, R. R., Masud, U. D., & Maske, R. G. (2015). *Comparison between Conventional (Angular) Steel Section and Tubular Steel Section*. www.ijera.com
- Patil, H., & Jeyakarthykeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012065>
- Prastianto, R. W., Syahroni, N., Syalsabila, F., & Rozi, M. F. (2024). Bending load effects on stress concentration factor distribution of multi-planar DTKY tubular joints. *E3S Web of Conferences*, 483. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448303018>
- Pratiwi, W. P., Ibrahim, B., Mohammad, D., Daryaly, H., Rekayasa, P. T., Manufaktur, P., Teknik, J., Bandung, M., Rekayasa, P., & Mekanik, P. (2025). Perancangan Semi Automatic Material Handling and Feeding Machine pada Industri Pembuatan Baut. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 24(01), 66–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.55893/jt.vol24no1.696>
- Rifai, A. I., Endriansah, D., Prasetijo, J., & Isradi, M. (2024). *The Corrosion Effect of Gusset Plates on the Steel Joint Structure of Bridges: A literature review based on VOS viewer* (hlm. 386–398). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-384-9_35
- Sitanggang, A. P., & Manurung, E. H. (2025). *Perencanaan Balok Lentur Tanpa Pengaku Lateral*. 2(7), 3320–3327.
- Supriyanto, A., & Yuniyanto, J. (2016). *Pengaruh Bentuk Penampang Batang Struktur Terhadap Tegangan dan Defleksi Oleh Beban Bending*.
- Susanti, S. D., Sutopo, W., & Ngadiman, N. H. A. (2021). Equipment Replacement Analysis from Manual Line to Automatic Line in Palletizing Activities: A Case Study. *IOP Conference Series:*

Materials Science and Engineering, 1096(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1096/1/012011>

Yue, Z., Wen, Q., & Ding, Y. (2022). Research on Torsional Characteristic and Stiffness Reinforcement of Main Girder of Half-Through Truss Bridge. *Sustainability (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/su14116628>

Zaccaria, F., Baldassarri, A., Palli, G., & Carricato, M. (2021). A Mobile Robotized System for Depalletizing Applications: Design and Experimentation. *IEEE Access*, 9, 96682–96691. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3092580>

Zgonnik, P. V., Kuzhaeva, A. A., & Berlinskiy, I. V. (2022). The Study of Metal Corrosion Resistance near Weld Joints When Erecting Building and Structures Composed of Precast Structures. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/app12052518>