

Desain Alat Bantu Khusus Untuk Proses Pengangkatan dan Pindahkan CNC HAAS V-F1

Yudi Siswanto⁽¹⁾, Hendi Lilih Wijayanto⁽²⁾, Inelwan⁽³⁾

Politeknik Industri Logam Morowali
Padabaho, Kec. Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, Indonesia

Email: ¹yudi@pilm.co.id, ²hendilw@gmail.com, ³inelwanrampung01@gmail.com

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima 31 Januari 2025
Direvisi 06 Januari 2026
Disetujui 27 April 2026
Dipublikasikan 25 Mei 2026

Keywords:

CNC Machine Transfer, Lifting Equipment, Structural Design, Simulation, Safety Factor

Kata Kunci:

Pemindahan Mesin CNC, Alat Bantu Angkat, Desain Struktur, Simulasi, Faktor Keamanan

Corresponding Author:

Name:
Hendi Lilih Wijayanto
Email:
hendilw@gmail.com

Abstract: The relocation of the Haas V-F1 CNC machine in a vocational education environment requires a special lifting tool that is safe, precise, and suitable for the limitations of campus facilities. This study aims to design and validate a special lifting tool that is compatible with the characteristics of the 3,539 kg Haas V-F1 CNC machine at the Morowali Metal Industry Polytechnic. The research method used an engineering design approach that included collecting technical data on the machine, structural static calculations, CAD modeling, and strength validation through finite element analysis (FEA). The analysis results show that at a nominal load of 34,682 N, the lifting tool has a maximum Von Mises stress of $1.49 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, a maximum deflection of 3.63 mm, and a safety factor (FoS) of 2.4, which indicates safe operating conditions and is well below the yield strength of structural steel. Gradual loading tests show that the structure still works elastically up to an additional load of 500 kg with a FoS of 1.3, but reaches a critical condition at an additional load of 650 kg with a FoS approaching 1.0. Thus, the lifting device is recommended to operate at a nominal load with a maximum additional load of 250 kg. This research resulted in a safe, practical, and feasible lifting device design that can be used as an operational standard for lifting CNC machines in vocational education environments.

Abstrak: Pemindahan mesin CNC Haas V-F1 di lingkungan pendidikan vokasi memerlukan alat angkat khusus yang aman, presisi, dan sesuai keterbatasan fasilitas kampus. Penelitian ini bertujuan merancang dan memvalidasi alat angkat (*special lifting tool*) yang kompatibel dengan karakteristik mesin CNC Haas V-F1 seberat 3.539 kg di Politeknik Industri Logam Morowali. Metode penelitian menggunakan pendekatan rekayasa desain yang meliputi pengumpulan data teknis mesin, perhitungan statika struktur, pemodelan CAD, serta validasi kekuatan melalui analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA). Hasil analisis menunjukkan bahwa pada beban nominal sebesar 34.682 N, alat angkat memiliki tegangan Von Mises maksimum sebesar $1,49 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, defleksi maksimum 3,63 mm, dan faktor keamanan (Factor of Safety/FoS) sebesar 2,4, yang menunjukkan kondisi operasi aman dan berada jauh di bawah batas luluh material baja struktural. Uji pembebanan bertahap menunjukkan bahwa struktur masih bekerja elastis hingga tambahan beban 500 kg dengan FoS 1,3, namun mencapai kondisi kritis pada tambahan beban 650 kg dengan FoS mendekati 1,0. Dengan demikian, alat angkat direkomendasikan beroperasi pada beban nominal dengan tambahan maksimum 250 kg. Penelitian ini menghasilkan desain alat angkat yang aman, aplikatif, dan layak digunakan sebagai standar operasional pengangkatan mesin CNC di lingkungan pendidikan vokasi.

PENDAHULUAN

Pengelolaan dan pemindahan mesin produksi berukuran besar, seperti CNC Haas V-F1, memerlukan sistem penanganan yang aman, presisi, dan sesuai standar industri guna mendukung keberlangsungan kegiatan pembelajaran dan praktikum di lingkungan pendidikan vokasi. Di Politeknik Industri Logam Morowali, mesin-mesin tersebut menjadi fasilitas penting dalam pelaksanaan pelatihan teknologi manufaktur, sehingga keberadaan sistem angkat yang memadai sangat berpengaruh terhadap efektivitas operasional. Efektivitas perpindahan material dalam suatu sistem mekanis bergantung pada hubungan antara gaya dorong, friksi, konsumsi daya, distribusi beban, serta stabilitas gerak (Chede, 2021). Ketika beban meningkat, respons mekanis sistem berubah, sehingga diperlukan rancangan alat angkat yang mampu mempertahankan stabilitas, menghindari kerusakan struktural, dan meminimalkan risiko kecelakaan (Hermawan et al., 2024). Dengan mempertimbangkan karakteristik mesin CNC yang memiliki titik angkat khusus, pusat gravitasi tertentu, serta dimensi besar, kebutuhan akan alat angkat yang kompatibel menjadi semakin mendesak (Soori et al., 2024). Keterbatasan fasilitas angkat yang tersedia di kampus mendorong perlunya perancangan alat khusus yang teruji secara teknis dan layak dioperasikan pada kondisi infrastruktur kampus yang tidak sepenuhnya mendukung peralatan industri berskala besar.

Permasalahan yang muncul di lingkungan kampus adalah ketiadaan alat angkat yang secara spesifik sesuai untuk menangani mesin CNC Haas V-F1. Selama ini proses pengangkatan sering dilakukan menggunakan metode manual atau alat yang bersifat general-purpose, sehingga meningkatkan risiko kecelakaan, kerusakan mesin, dan ketidakefisienan operasional. Hambatan fisik seperti lebar pintu workshop, kapasitas lantai, dan ketersediaan forklift juga menjadi faktor pembatas yang menyulitkan pemindahan mesin berat secara aman. Hingga saat ini, berbagai penelitian mengenai sistem mekanis dan alat angkat telah dilakukan, seperti penguatan rangka, modifikasi komponen, dan penerapan sensor untuk kontrol otomatis. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya fokus pada satu aspek tertentu dan belum mengintegrasikan kebutuhan struktur, pusat gravitasi, titik angkat, serta keterbatasan fasilitas secara simultan. Analisis empiris mengenai perilaku sistem berbeban besar dalam ruang terbatas juga masih minim dalam konteks pendidikan vokasi (Jalinus et al., 2023). Kondisi ini menghasilkan celah penelitian yang menuntut solusi rekayasa yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga praktis, adaptif, dan sesuai dengan kondisi nyata kampus.

Mesin CNC Haas V-F1 merupakan mesin milling vertikal berpresisi tinggi yang banyak digunakan dalam proses manufaktur berbasis kontrol numerik (Yoon et al., 2025). Mesin ini memiliki dimensi besar, struktur rigid, serta bobot yang signifikan, sehingga proses pengangkatannya memerlukan prosedur teknis yang memenuhi standar keselamatan industri (Racz et al., 2020). Pabrikan mesin telah menetapkan titik angkat tertentu yang berfungsi sebagai panduan untuk memastikan distribusi gaya tetap seimbang selama proses pengangkatan (Lima et al., 2022). Pusat gravitasi mesin yang tidak merata membuat proses pemindahan tanpa alat bantu khusus berpotensi menimbulkan ketidakstabilan serta risiko kerusakan pada komponen sensitif seperti spindle, motor servo, dan unit kontrol (Buulolo et al., 2021). Oleh karena itu, pemahaman mengenai geometri mesin, pusat gravitasi, serta titik angkat pabrikan menjadi landasan penting dalam merancang alat bantu angkat yang aman dan kompatibel. Penelitian ini memanfaatkan karakteristik mesin CNC tersebut sebagai dasar dalam menyusun desain special tools yang dapat mendukung kegiatan penanganan dan pemindahan di lingkungan kampus.

Lifting engineering merupakan disiplin yang mempelajari mekanisme pengangkatan beban dengan mempertimbangkan aspek gaya, stabilitas, struktur, dan keselamatan (Sarmiento-Ortiz et al., 2024). Proses pengangkatan beban berat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti distribusi massa, gaya reaksi tumpuan, friksi, momen lentur, serta tegangan material (Nguyen, 2019). Dalam merancang alat angkat, perhitungan gaya tarik, tegangan geser, dan kemampuan material menjadi elemen utama untuk menentukan kelayakan struktur (Widhianti & Saputra, 2022). Standar industri, seperti ASME B30 dan OSHA, menekankan pentingnya faktor keamanan (safety factor) untuk memastikan alat tetap mampu menahan beban melebihi kapasitas kerjanya

(Alkhaledi et al., 2022). Profil baja seperti S275 dan S355 banyak digunakan karena memiliki ketahanan terhadap deformasi dan kekuatan tarik yang tinggi. Dalam konteks mesin CNC Haas V-F1, struktur alat angkat harus dirancang agar mampu mendistribusikan gaya secara merata dan menjaga stabilitas beban selama proses pemindahan tanpa menimbulkan deformasi yang dapat mengganggu kinerja mesin.

Special tools untuk pengangkatan merupakan perangkat yang dirancang secara khusus untuk menyesuaikan geometri, berat, dan titik angkat suatu objek tertentu (Rosyidin, 2017, p. 1). Dalam industri manufaktur, special lifting tools digunakan untuk meminimalkan risiko kerusakan saat pemindahan peralatan berat sekaligus meningkatkan efisiensi kerja (Umar et al., 2019). Alat angkat ini dapat berupa lifting frame, spreader beam, sling guide, dan forklift adapter yang dibuat berdasarkan analisis teknis terhadap beban yang ditangani (Sarmiento-Ortiz et al., 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan alat angkat khusus dapat mengurangi ketergantungan terhadap metode manual dan mencegah terjadinya ketidakseimbangan beban yang dapat menyebabkan kegagalan struktural. Pada penelitian yang menjadi dasar penelitian ini, special tools dirancang melalui pemodelan 3D dan analisis simulasi pembebanan untuk memastikan keamanan struktur sebelum difabrikasi (Akbar et al., 2024). Pendekatan ini sejalan dengan praktik industri yang menuntut validasi melalui pengujian numerik untuk mengurangi risiko kesalahan pada tahap implementasi.

Penelitian terdahulu mengenai alat angkat dan simulasi pembebanan menunjukkan penerapan yang luas dalam industri besar, namun relatif terbatas dalam konteks pendidikan vokasi. Studi mengenai frame lifting, spreader beam, dan alat angkat khusus banyak memusatkan perhatian pada peningkatan kekuatan struktur dan efisiensi pengangkatan, tetapi belum menyentuh aspek kompatibilitas dengan lingkungan kampus yang memiliki keterbatasan ruang, kapasitas lantai, dan akses forklift (Hermawan et al., 2024). Penelitian mengisi celah penelitian tersebut dengan merancang special tools yang disesuaikan dengan karakteristik mesin CNC Haas V-F1 dan kondisi fasilitas kampus. Pendekatan integratif melalui perancangan 3D, analisis struktur, serta simulasi pembebanan memberikan kontribusi baru pada penelitian alat angkat dalam skala pendidikan vokasi.

Penelitian ini menawarkan novelty berupa pengembangan alat angkat khusus yang disesuaikan secara langsung dengan karakteristik mesin CNC Haas V-F1 dan keterbatasan infrastruktur kampus Politeknik Industri Logam Morowali. Tidak seperti alat angkat konvensional, desain yang dikembangkan mempertimbangkan titik angkat asli mesin, pusat gravitasi, dimensi ruang, serta kemampuan forklift yang tersedia, sehingga menghasilkan alat yang aman, kompatibel, dan efisien (Junus, 2023, p. 18). Inovasi lain terletak pada integrasi frame lifting dengan forklift pockets yang dirancang secara presisi untuk menghindari penggunaan metode pengangkatan yang tidak sesuai standar K3 (Jadhav, 2024, p. 4203). Desain alat angkat ini didasarkan pada perhitungan struktur sederhana, namun tetap memenuhi faktor keamanan melalui proses verifikasi teknis dan rencana uji beban. Selain menghasilkan prototipe yang siap difabrikasi, penelitian ini juga menghadirkan pendekatan rekayasa yang dapat dijadikan modul pembelajaran, referensi desain, dan standar operasional baru untuk aktivitas laboratorium. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini tidak hanya berada pada aspek teknis alat, tetapi juga pada integrasi aspek edukatif dan operasional yang belum banyak dikembangkan di lingkungan pendidikan vokasi di Indonesia.

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan desain alat angkat yang aman, efektif, dan dapat digunakan secara langsung dalam proses pemindahan mesin CNC Haas V-F1. Tujuan khusus meliputi identifikasi kebutuhan teknis, perancangan struktur alat berdasarkan titik angkat dan pusat gravitasi, pemilihan material yang memenuhi faktor keamanan, penyusunan gambar kerja dan daftar bahan, serta penyusunan SOP pengoperasian dan uji beban. Urgensi penelitian ini sangat tinggi mengingat nilai investasi mesin CNC yang besar, risiko kerusakan akibat pengangkatan yang salah, serta potensi kecelakaan kerja yang dapat terjadi pada teknisi laboratorium. Dengan adanya alat angkat yang dirancang secara tepat, kegiatan praktikum, pemeliharaan mesin, dan manajemen aset kampus dapat berjalan lebih aman dan efisien.

Kontribusi penelitian ini tidak hanya memberikan solusi teknis berupa perangkat angkat siap guna, tetapi juga meningkatkan kualitas pengelolaan laboratorium, menambah referensi pembelajaran bagi mahasiswa, dan membuka peluang pengembangan alat sejenis untuk fasilitas lain di kampus. Penelitian ini mendukung upaya peningkatan mutu pendidikan vokasi berbasis industri melalui penyediaan teknologi yang relevan, aplikatif, dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa desain (engineering design) untuk menghasilkan alat angkat khusus yang aman dan kompatibel dengan mesin CNC Haas V-F1 di lingkungan Politeknik Industri Logam Morowali. Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data utama, meliputi berat mesin sebesar 3539 kg, dimensi fisik, titik angkat pabrikan, serta kondisi ruang dan peralatan angkat yang tersedia di kampus. Data tersebut dianalisis bersama prinsip statika struktur, khususnya perhitungan reaksi tumpuan, momen lentur maksimum, tegangan lentur, dan defleksi. Pemodelan geometri dilakukan menggunakan perangkat CAD untuk memvisualisasikan konfigurasi frame lifting, menentukan posisi tumpuan, serta memastikan alat kompatibel dengan jalur pengangkatan dan kapasitas forklift kampus. Tahap ini menghasilkan model awal yang menjadi dasar analisis teknis sebelum dilakukan evaluasi numerik lanjutan.

Pemilihan bahan pada perancangan alat angkat menjadi aspek krusial karena menentukan kemampuan struktur dalam menahan gaya, momen lentur, deformasi, serta beban dinamis yang timbul selama proses lifting. Material yang digunakan harus memiliki kekuatan tarik tinggi, ketangguhan yang baik, kemampuan las yang stabil, serta kompatibilitas terhadap beban 3.539 kg dari mesin CNC Haas V-F1. Berdasarkan kebutuhan tersebut, bahan yang paling tepat digunakan adalah baja karbon struktural, seperti S275 atau S355, yang umum dipakai pada struktur pengangkat industri. Baja ini memiliki nilai yield strength antara 275–355 MPa, sehingga mampu memberikan margin keamanan yang cukup terhadap tegangan maksimum hasil simulasi sebesar $1,49 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Selain itu, modulus elastisitas baja sebesar 210 GPa memberikan kekakuan yang tinggi sehingga struktur tidak mengalami deformasi berlebihan. Karakteristik fisik tersebut memastikan bahwa frame lifting tetap berada pada domain elastis selama menerima beban maksimum sesuai hasil FEA yang menunjukkan deformasi hanya 3,633 mm, jauh di bawah batas toleransi struktur pengangkat.

Material dipilih tidak hanya berdasarkan kekuatan mekanik, tetapi juga ketersediaan lokal, kemudahan pengerjaan, dan biaya produksi. Oleh karena itu, kombinasi bahan seperti plat baja 10 mm, besi nako, sling baja Ø16 mm, webbing sling kapasitas 3 ton, dan baut mata M16–M24 dipilih untuk memenuhi kebutuhan struktural sekaligus mempertimbangkan keterbatasan fasilitas bengkel kampus. Plat baja digunakan pada elemen yang menerima gaya tekan dan momen lentur terbesar, sedangkan besi nako dipilih untuk bagian rangka karena konstruksinya yang ringan namun cukup kuat. Sling baja Ø16 mm dipilih berdasarkan perhitungan Safe Working Load (SWL) sebesar 1,38 ton, yang masih berada di atas gaya pada titik B, yaitu 10.013 N. Webbing sling dipilih karena fleksibel dan mampu mengurangi risiko goresan pada permukaan mesin. Baut mata M16 dipilih berdasarkan kapasitas tarik 816.526 N, cukup aman untuk pembebanan yang terjadi di titik sambungan. Dengan demikian, pemilihan bahan yang digunakan dalam perancangan ini tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi, keselamatan, dan kemampuan proses pembuatan di lingkungan kampus.

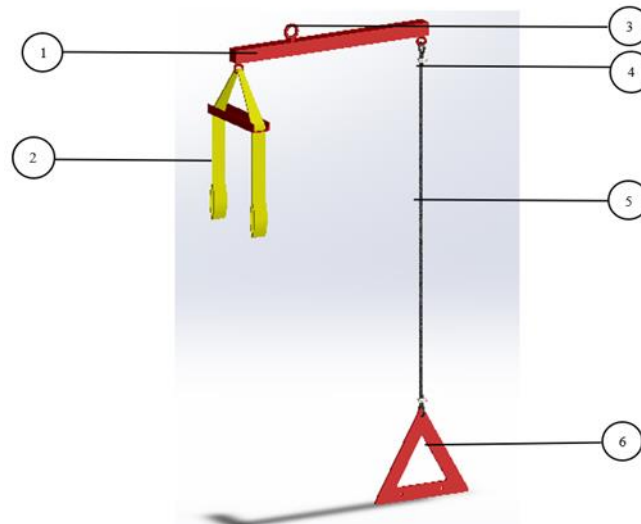
Setelah model awal dibuat, analisis kekuatan struktur dilakukan melalui perhitungan manual dan simulasi elemen hingga (Finite Element Analysis) untuk menilai kemampuan alat angkat menahan beban mesin. Beban sebesar 34.682 N ditempatkan pada titik angkat sesuai data mesin dan diuji terhadap batas tegangan material baja struktural melalui analisis tegangan von Mises dan deformasi total. Perbandingan hasil analisis statik dan FEA digunakan untuk menentukan faktor keamanan (FoS), yang pada desain akhir mencapai nilai 2,4 sehingga dinyatakan memenuhi standar keselamatan. Hasil evaluasi digunakan untuk memperbaiki geometri, menambah pengaku (stiffener), atau menyesuaikan ketebalan profil jika diperlukan.

Tahapan penelitian ditutup dengan penyusunan gambar kerja, dokumentasi desain, dan rekomendasi operasional sebagai dasar penggunaan alat angkat di laboratorium kampus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Struktur dan Simulasi Pembebanan

Analisis struktur diperlukan untuk mengevaluasi kemampuan alat angkat dalam menahan beban sesuai spesifikasi (Yuda & Waty, 2024). Metode ini melibatkan perhitungan tegangan maksimum, distribusi gaya, serta pemeriksaan deformasi agar struktur tetap berada dalam batas aman (Mereuta, 2024). Simulasi berbasis metode elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) sering digunakan untuk menilai respons struktur terhadap beban statik maupun dinamik (Antartika et al., 2020, p. 75). Hasil simulasi memungkinkan perancang mengidentifikasi area kritis yang berpotensi mengalami kegagalan sehingga desain dapat dioptimalkan sebelum tahap produksi (Suprpto & Wibawa, 2021).



Gambar 1. Desain alat angkat

1. Bar pengangkat
2. Webbing sling
3. Baut Mata
4. Clamp sling
5. Sling baja
6. Penopang ragum

Penelitian ini menerapkan simulasi pembebanan untuk mengevaluasi special tools yang dirancang, termasuk pemeriksaan tegangan maksimum dan displacement. Keberhasilan simulasi menunjukkan bahwa alat memiliki kekuatan yang memadai untuk mengangkat mesin CNC Haas V-F1. Dengan demikian, simulasi menjadi bagian integral dalam kajian teori perancangan alat angkat, terutama dalam konteks lingkungan pendidikan yang membutuhkan akurasi dan keselamatan maksimal.

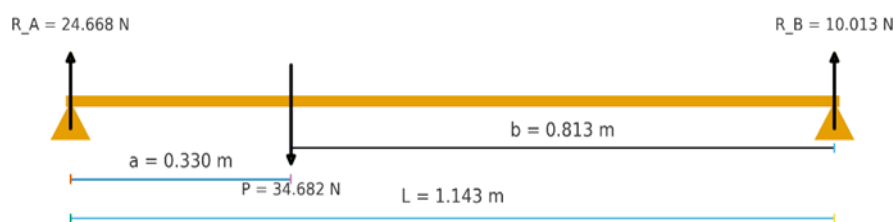
Standar Keselamatan Kerja (K3) pada Pengangkatan Beban

Pengangkatan beban berat harus mematuhi prinsip-prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) untuk mencegah kecelakaan dan kerusakan peralatan (Skiba, 2020). Regulasi seperti ISO 12480, ASME B30.20, dan standar OSHA memberikan pedoman teknis mengenai desain alat angkat, inspeksi rutin, tanda beban maksimum (WLL), serta prosedur operasional (Aprizaldi & Saputro, 2022, p. 91). Kesalahan dalam proses pengangkatan dapat menyebabkan kerugian finansial, cedera, hingga kerusakan permanen pada mesin (Yanbin et al., 2023, p. 2). Oleh karena itu, setiap tahap mulai dari desain, penggunaan, hingga pemeliharaan alat angkat harus mengikuti

standar yang berlaku. Dalam konteks kampus Politeknik Industri Logam Morowali, penerapan standar K3 sangat penting karena aktivitas pengangkatan mesin CNC dilakukan oleh teknisi laboratorium dan mahasiswa yang membutuhkan panduan keselamatan yang jelas. Tinjauan pustaka ini menegaskan bahwa penerapan standar K3 merupakan fondasi yang tidak terpisahkan dalam pengembangan special tools untuk pengangkatan mesin CNC.

Rumus Reaksi Kesetimbangan dalam Sistem Pengangkatan

Rumus reaksi kesetimbangan digunakan untuk menganalisis gaya-gaya yang bekerja pada struktur alat angkat saat menerima beban mesin CNC Haas V-F1 (Sanches et al., 2024, p. 3). Prinsip dasar yang digunakan adalah kondisi $\sum F = 0$ dan $\sum M = 0$, yang menyatakan bahwa total gaya dan total momen pada struktur harus berada dalam keadaan seimbang (Borges et al., 2009). Jika sistem pengangkatan menggunakan dua titik tumpu, gaya reaksi pada masing-masing titik dihitung berdasarkan distribusi beban yang dipengaruhi oleh posisi pusat gravitasi dan jarak antar tumpuan. Persamaannya dapat dituliskan:



Gambar 2. Reaksi Kesetimbangan dalam Sistem Pengangkatan

Di mana W adalah berat total mesin CNC, L_1 dan L_2 adalah jarak beban terhadap masing-masing tumpuan, dan R_1 – R_2 merupakan reaksi yang diterima alat angkat. Rumus ini membantu menentukan apakah rangka lifting mampu mendistribusikan beban secara merata atau terdapat titik kritis yang berpotensi mengalami overstress. Dalam artikel Anda, persamaan kesetimbangan ini digunakan untuk menilai apakah special tools yang dirancang mampu menahan gaya total mesin dan meminimalkan risiko rotasi atau ketidakseimbangan selama proses pengangkatan. Analisis kesetimbangan ini merupakan dasar penting sebelum dilakukan simulasi elemen hingga agar hasil desain valid secara mekanis.

Analisis Distribusi Beban dan Reaksi Struktur

Perhitungan reaksi tumpuan dilakukan untuk menentukan distribusi beban yang bekerja pada dua titik tumpu frame lifting. Berat mesin CNC Haas V-F1 sebesar $W = 3539$ kg dikonversi menjadi gaya vertikal:

$$P = mg = 3539 \times 9,81 = 34682,2 \text{ N}$$

Distribusi reaksi pada tumpuan A dan B dihitung dengan persamaan:

$$R_A = \frac{P(L - a)}{L}, R_B = \frac{Pa}{L}$$

Dengan $L = 1,143$ m, $a = 0,33$ m, dan $b = 0,813$ m, diperoleh:

$$R_A = 24668,97 \text{ N}, R_B = 10013,23 \text{ N}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sekitar 71% beban terpusat pada tumpuan A, sehingga area tersebut menjadi zona kritis. Momen lentur maksimum dihitung menggunakan:

$$M_{max} = R_A \cdot a$$

Sehingga diperoleh:

$$M_{max} = 8,1408 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Hasil ini sesuai dengan pola tegangan pada simulasi, di mana konsentrasi beban dominan muncul di sekitar titik A.

Evaluasi Kekuatan Komponen Pengangkat

Komponen pendukung dianalisis menggunakan persamaan dasar kapasitas tarik dan tegangan kerja. Untuk webbing sling (sudut 60°), gaya kerja sling dihitung dengan:

$$F_{sling} = \frac{W}{2\cos\theta}$$

$$F_{sling} = \frac{34682,2}{2\cos 60^\circ} = 14242 \text{ N}$$

Nilai ini masih jauh di bawah kapasitas nominal 3 ton. Kapasitas tarik baut mata dihitung menggunakan:

$$F = \sigma_y \cdot A_s$$

Dengan luas efektif ulir (A_s) dan tegangan luluh material, diperoleh:

$$F = 816.526 \text{ N}$$

yang masih lebih tinggi dari gaya tarik yang bekerja pada baut. Konsistensi antara beban aktual dan kapasitas komponen menunjukkan bahwa setiap elemen pengangkat berada dalam batas aman.

Validasi Kekuatan Struktur melalui FEA

Simulasi elemen hingga digunakan untuk memverifikasi hasil analisis manual. Tegangan maksimum diperoleh dari tegangan von Mises:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

Simulasi menunjukkan nilai:

$$\sigma_{vm} = 1,49 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

yang masih berada di bawah yield strength material baja. Deformasi maksimum sebesar:

$$\delta_{max} = 3,633 \text{ mm}$$

juga berada dalam batas aman untuk struktur penopang. Faktor keamanan dihitung menggunakan:

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

dengan hasil:

$$FoS = 2,4$$

Nilai ini menunjukkan bahwa struktur bekerja jauh di dalam zona elastis dan memiliki margin keselamatan yang tinggi.

Uji Kenaikan Beban dan Penentuan Batas Kritis

Untuk mengetahui batas aman desain, pembebanan dinaikkan secara bertahap. Pada +250 kg, FoS menurun menjadi 1,8, sementara deformasi meningkat namun tetap dalam batas elastis. Pada +500 kg, FoS mencapai 1,3, mendekati ambang desain tetapi tidak menimbulkan anomali struktural. Batas kritis ditentukan pada:

$$FoS = 1(\text{beban } +650 \text{ kg})$$

yang berarti struktur mencapai ambang batas kekuatan. Ketika beban ditingkatkan menjadi +700 kg, diperoleh:

$$FoS = 0,99$$

Menunjukkan potensi awal kegagalan struktural. Dengan demikian, beban tambahan maksimum yang dapat diterima alat angkat adalah +650 kg di atas beban dasar, dan tidak direkomendasikan melebihi nilai tersebut.

Hasil simulasi

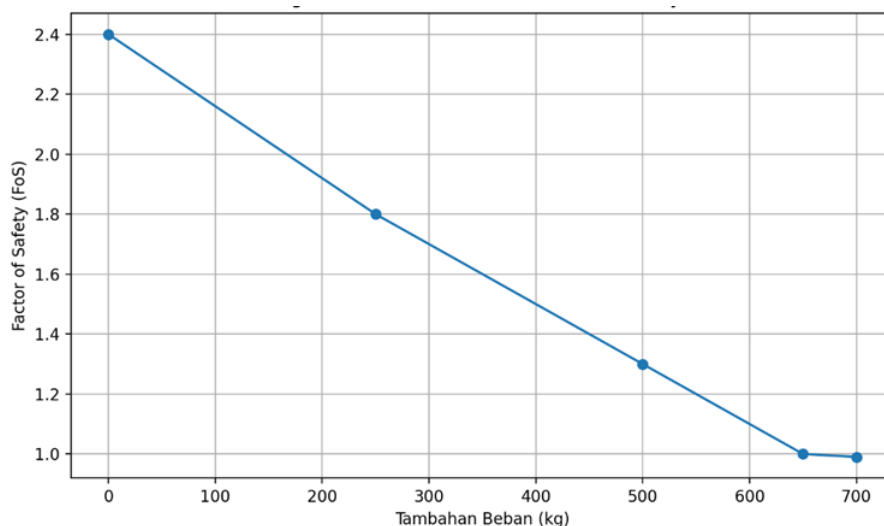
Tabel 1. Ringkasan hasil simulasi memberikan gambaran komprehensif mengenai respons struktural alat angkat terhadap variasi pembebanan yang diberikan pada mesin CNC Haas

V-F1. Peningkatan massa tambahan menunjukkan pola penurunan faktor keamanan (FoS) yang konsisten dengan kenaikan tegangan internal dan deformasi pada struktur. Pada beban dasar tanpa tambahan, nilai FoS sebesar 2,4 mencerminkan kondisi operasi yang sangat aman, dengan deformasi maksimum hanya 3,633 mm dan tegangan Von Mises sebesar $1,49 \times 10^8$ N/m², jauh di bawah batas luluh material. Namun, ketika beban dinaikkan menjadi 250 kg dan 500 kg, nilai FoS menurun berturut-turut menjadi 1,8 dan 1,3, sekaligus diikuti oleh peningkatan deformasi hingga 6,191 mm. Meski struktur masih berada dalam domain elastis pada kondisi ini, pola kenaikan regangan memperlihatkan adanya kecenderungan mendekati batas kritis yang perlu diperhatikan dalam operasi pengangkatan.

Tabel 1. Ringkasan hasil simulasi

Tambahan (kg)	Total Massa (kg)	Total Beban (N)	FoS	Displacement Max (mm)	VonMises Max (N/m ²)
0	3539	34682.20	2.40	3.633	1.490e+08
250	3789	37220.20	1.80	4.912	1.948e+08
500	4039	39758.20	1.30	6.191	1948e+08
650	4189	41098.90	1.00	6.959	3.351e+08
700	4239	41619.90	0.99	7.215	3.557e+08

Kondisi yang lebih signifikan terlihat pada skenario pembebanan 650 kg dan 700 kg, di mana nilai FoS turun hingga mendekati 1,0 dan 0,99. Pada titik ini, struktur memasuki batas aman minimum dan menunjukkan potensi awal kegagalan material ketika tegangan Von Mises mencapai $3,351 \times 10^8$ hingga $3,557 \times 10^8$ N/m², mendekati nilai yield strength baja struktural yang digunakan. Deformasi juga meningkat hingga lebih dari 7 mm, menandakan penurunan kekakuan dan meningkatnya risiko deformasi permanen. Secara keseluruhan, tabel tersebut mengindikasikan bahwa alat angkat bekerja optimal pada beban nominal, namun tidak direkomendasikan untuk menerima beban tambahan melebihi 650 kg. Data ini berfungsi sebagai dasar penting dalam penyusunan standar operasional (SOP), penentuan batas aman pengangkatan, dan validasi desain alat angkat agar sesuai dengan prinsip keselamatan kerja.



Gambar 3. Safety Factory

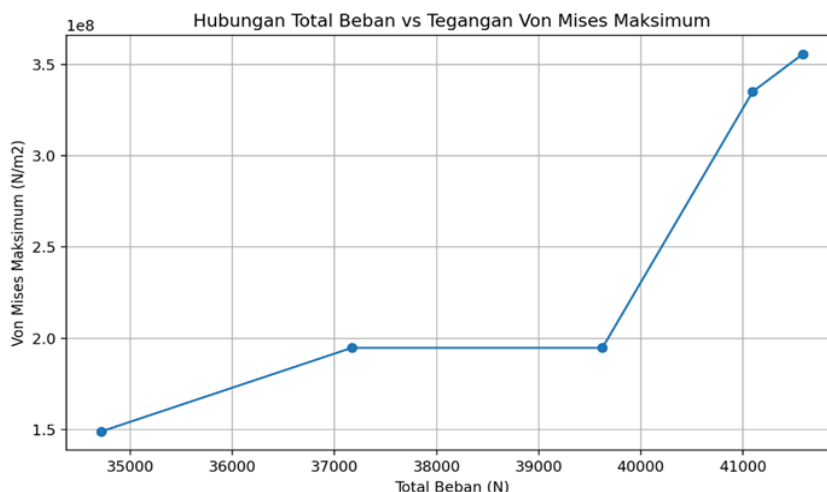
Diagram hubungan antara tambahan beban dan Factor of Safety (FoS) menunjukkan kecenderungan penurunan linier yang stabil, menandakan bahwa peningkatan beban memiliki pengaruh langsung dan proporsional terhadap degradasi margin keamanan struktur. Pada beban nominal tanpa tambahan, FoS sebesar 2,4 mengindikasikan kapasitas struktural yang robust dan jauh dari batas plastis material. Namun, penurunan signifikan mulai terjadi ketika beban meningkat menjadi 250 kg, dengan FoS turun menjadi 1,8, mencerminkan sensitivitas struktur

terhadap beban tambahan dan meningkatnya kontribusi tegangan lokal pada titik kritis. Kemiringan kurva pada rentang awal ini menunjukkan bahwa struktur masih mempertahankan perilaku elastis, tetapi dengan pengurangan margin keamanan yang terukur.

Pada pembebanan di atas 500 kg, kurva menunjukkan zona transisi menuju kondisi kritis, ditandai dengan FoS sebesar 1,3, yang mencerminkan bahwa struktur mulai bekerja mendekati batas desainnya. Penurunan drastis FoS menjadi 1,0 pada beban 650 kg mengindikasikan bahwa struktur telah mencapai ambang operasional minimum dan tidak lagi memiliki redundansi struktural. Kondisi ini dipertegas oleh FoS 0,99 pada 700 kg, menandakan bahwa struktur memasuki zona risiko dengan kemungkinan terjadinya regangan plastis atau kegagalan lokal. Secara keseluruhan, pola penurunan FoS pada diagram ini menunjukkan bahwa desain alat angkat memiliki kapasitas optimal pada beban nominal, tetapi tidak memiliki cadangan kekuatan yang memadai untuk pembebanan berlebih. Analisis ini mengonfirmasi perlunya pembatasan beban operasional untuk menjaga integritas struktural dan mencegah kegagalan selama proses pengangkatan mesin CNC.

Defleksi dan Tegangan vs Beban

Analisis grafik defleksi dan tegangan Von Mises terhadap peningkatan total beban menunjukkan respons struktural yang konsisten dengan karakteristik elemen rangka baja yang bekerja di bawah pembebanan statis terdistribusi. Peningkatan defleksi maksimum yang cenderung linier menegaskan bahwa struktur alat angkat beroperasi dalam domain elastis untuk rentang beban 0–500 kg, dengan deformasi yang masih berada pada batas aman sehingga tidak mengindikasikan penurunan kekakuan yang signifikan. Namun, pada beban 650 kg ke atas, kurva mulai menunjukkan tendensi peningkatan defleksi yang lebih curam, mengindikasikan bahwa elemen rangka mendekati batas elastisitas dan mulai mengalami penurunan kekakuan struktural, yang secara teoritis dapat dikaitkan dengan akumulasi regangan lokal pada titik sambungan atau pengaku



Gambar 4. Total Beban Vs Tegangan

Hal yang sama tercermin pada grafik tegangan Von Mises yang menunjukkan peningkatan moderat pada rentang beban rendah hingga menengah, tetapi mengalami lonjakan tajam ketika beban mendekati kapasitas maksimum desain. Nilai Von Mises yang mendekati atau melampaui batas luluh material pada beban 650–700 kg menunjukkan adanya konsentrasi tegangan pada zona kritis, yang dapat disebabkan oleh ketidakseragaman distribusi gaya atau efek geometri pada sudut rangka. Secara keseluruhan, kedua grafik tersebut mengungkapkan bahwa alat angkat memiliki performa struktural yang aman dan stabil pada beban nominal, namun tidak memiliki margin keamanan yang memadai untuk pembebanan berlebih. Oleh karena itu, pembatasan beban operasional mutlak diperlukan untuk memastikan integritas struktural dan mencegah kegagalan prematur selama pengangkatan mesin CNC.

SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan desain alat angkat khusus untuk CNC Haas V-F1 yang terbukti aman digunakan pada beban operasional hingga sekitar 40.000 N dengan nilai Factor of Safety (FoS) $\geq 1,8$ dan defleksi maksimal ≤ 5 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada beban nominal, alat angkat memiliki FoS 2,4, tegangan Von Mises $1,49 \times 10^8$ N/m², dan defleksi 3,63 mm, menandakan struktur bekerja jauh di bawah batas elastis material. Namun, pada beban tinggi (56.578–58.921 N), tegangan meningkat hingga $3,35\text{--}3,55 \times 10^8$ N/m² dan FoS turun menjadi 1,0–0,99, yang menunjukkan kondisi kritis. Dengan demikian, alat angkat direkomendasikan hanya digunakan dalam batas beban aman ≤ 250 kg tambahan, agar integritas struktural tetap terjaga dan risiko kegagalan dapat dihindari.

DAFTAR RUJUKAN

- Akbar, S., Syahrudin, S., Kartiko, I. J., & Purnawarman, O. (2024). Rancang Bangun Special Service Tool Remove dan Install Valve Spring Engine Dxi11 pada Unit Renault Trucks. *Jurnal Alat Berat*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.32487/jab.v1i1.8>
- Alkhaledi, K., Means, K. H., & Dalalah, D. (2022). Enhancing the safety and reliability for loading and unloading bulk storage bags and a new bulk feeder support design structure. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 17(4), 462. <https://doi.org/10.1504/ijcaet.2022.126661>
- Antartika, M. P., Budianto, B., Ari, M., & Suastika, I. K. (2020). The PERBANDINGAN HASIL ANALISIS METODE ELEMEN HINGGA BERBASIS SOFTWARE DENGAN SIMPLE SUPPORTED CALCULATION PADA KAPAL 50 PAX CRANE BARGE. *JURNAL INTEGRASI*, 12(1), 72. <https://doi.org/10.30871/ji.v12i1.1451>
- Aprizaldi, M. F., & Saputro, C. D. (2022). Analisis Risiko Kecelakaan Kerja dalam Penggunaan Tower Crane dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) (Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung Teaching Industry Learning Center (TILC) Sekolah Vokasi UGM). *INERSIA Informasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 18(1), 83. <https://doi.org/10.21831/inersia.v18i1.34081>
- Buulolo, M., Wilson, W., & Budiman, I. (2021). Mitigasi Risiko Downtime Mesin Crane dengan Reliability Centered Maintenance. *JOURNAL OF INDUSTRIAL AND MANUFACTURE ENGINEERING*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.31289/jime.v5i1.3615>
- Chede, B. (2021). Design Consideration of Material Handling Equipment for Ganga Iron and Steel Limited, Nagpur. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9, 1221. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36291>
- Hermawan, D., Hakim, A. R., Anwar, S., & Prayitno, D. (2024). PERENCANAAN PORTABLE CRANE KAPASITAS ANGKAT 1000 KG. *Deleted Journal*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.51616/teks.v5i1.507>
- Jadhav, Mr. R. R. (2024). Design and Development of Portable forklift. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(4), 4201. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.60847>
- Jalinus, N., Syahril, S., Haq, S., & Kassymova, G. K. (2023). Work-based learning for the engineering field in vocational education: Understanding concepts, principles and best practices. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.58712/jerel.v2i1.22>
- Junus, S. (2023). Design Of Lifting Aid Materials To Optimize Waste Loading Into Sealed Containers. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing Technology*, 4(1), 17. <https://doi.org/10.31315/jmept.v4i1.10185>
- Lima, I. V. D. S., Tuapetel, J. V., & Rahman, A. Z. (2022). Perancangan dan analisis kekuatan statis pada fixed-portable hydraulic scissor car lift platform dengan kapasitas 2 ton. *SINTEK JURNAL Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 16(2), 92. <https://doi.org/10.24853/sintek.16.2.92-103>

- Mereuta, V. (2024). FEM Analysis of Crane Hooks with Different Cross Section. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(11), 2468. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.65625>
- Nguyen, T. H. V. (2019). Modelling and Analysis of Thermomechanical Stress at Connected Areas of Mini-lifting equipment using Three Different Methods. *International Journal of Engineering Research And, I*. <https://doi.org/10.17577/ijertv8is010101>
- Racz, S., Breaz, R.-E., & Cioca, L. (2020). Hazards That Can Affect CNC Machine Tools during Operation—An AHP Approach. *Safety*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.3390/safety6010010>
- Rosyidin, A. (2017). ANALISIS KINERJA MINI FORKLIFT SEBAGAI ALAT BANTU ANGKAT DAN ANGKUT DENGAN BERBAGAI VARIASI BEBAN 300 – 500 KG PADA LAB TEKNIK MESIN UMT. *Motor Bakar Jurnal Teknik Mesin*, 1(2). <https://doi.org/10.31000/mbjtm.v1i2.727>
- Sanches, L. V., Goulart, C. A., Mac-Lean, P. A. B., & Villas-Bôas, L. A. (2024). Mechanical analysis and materials selection of a scissor lift system for pig transportation. *Acta Scientiarum. Technology/Acta Scientiarum. Technology*, 46(1). <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v46i1.65406>
- Sarmiento-Ortiz, F., Topón-Visarrea, B., Iza, C., Morales, J., & León, V. (2024). Design of a load elevator as a measure to reduce ergonomic risks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1370(1), 12011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1370/1/012011>
- Skiba, R. (2020). Best Practice Standards and Methodology for Crane Operator Training—A Global Perspective. *Journal of Transportation Technologies*, 10(3), 265. <https://doi.org/10.4236/jtts.2020.103017>
- Soori, M., Jough, F. K. G., Dastres, R., & Arezoo, B. (2024). Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review [Review of *Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review*]. *Acta Mechanica et Automatica*, 18(3), 434. De Gruyter Open. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0048>
- Suprpto, R. K. N., & Wibawa, L. A. N. (2021). Desain dan Analisis Tegangan Rangka Alat Simulasi Pergerakan Kendali Terbang Menggunakan Metode Elemen Hingga. *JTM-ITI (Jurnal Teknik Mesin ITI)*, 5(1), 19. <https://doi.org/10.31543/jtm.v5i1.559>
- Umar, R. Z. R., Ahmad, N., Halim, I., Lee, P. Y., & Hamid, M. (2019). Design and Development of an Ergonomic Trolley-Lifter for Sheet Metal Handling Task: A Preliminary Study. *Safety and Health at Work*, 10(3), 327. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2019.06.006>
- Widhianti, Y., & Saputra, A. (2022). Analisa Kekuatan Dan Getaran Overhead Crane 10 Ton Double Girder Dengan Bentangan 17 Meter Proses Material Handling. *Teknobiz Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin*, 12(2), 115. <https://doi.org/10.35814/teknobiz.v12i2.3616>
- Widianto, A., Arrozi, W., Sampurno, Y. G., Paryanto, P., Widowati, A., Aminatun, T., & Sunarta, S. (2025). Development of a mobile hydraulic press machine using finite element analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 76. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.316584>
- Yanbin, X., Zhang, J., Wang, X., Shabaz, M., Ahmad, M. W., & Ray, S. (2023). Research on optimization of crane fault predictive control system based on data mining. *Nonlinear Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0202>
- Yoon, J. S., Park, I.-H., & Lee, D. Y. (2025). A Review of Intelligent Machining Process in CNC Machine Tool Systems [Review of *A Review of Intelligent Machining Process in CNC Machine Tool Systems*]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01343-1>
- Yuda, D. W., & Waty, M. (2024). ANALISIS BATA RINGAN YANG PECAH SAAT DIANGKAT OLEH TOWER CRANE. *JMTS Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 249. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.26630>