

Analisis Kekuatan *Lifting Lug* pada Proses *Dismantling Chimney* Berbasis *Finite Element Analysis*

Wisnu Hilmansyah^{1*}, Dewi Puspitasari², Tinton Davareza³

^{1,2,3}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: *wisnu.22019@mhs.unesa.ac.id

Abstrak: Proses *dismantling chimney* memerlukan sistem pengangkatan yang aman dan andal, di mana *lifting lug* berperan sebagai komponen utama dalam mentransfer beban ke alat angkat. Kegagalan desain *lifting lug* dapat menimbulkan risiko keselamatan yang tinggi selama proses pengangkatan struktur bertingkat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktural desain *lifting lug* pada proses *dismantling chimney* secara bertahap menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). *Chimney* dibagi menjadi tiga kondisi pembebanan yang merepresentasikan perbedaan massa segmen, yaitu segmen 1–5, 6–14, dan 15–23. Analisis dilakukan menggunakan *SolidWorks Simulation* dengan material baja struktural ASTM A36 dan asumsi pembebanan statis. Parameter hasil yang dianalisis meliputi tegangan *Von mises*, regangan *Von mises*, dan deformasi total. Hasil simulasi menunjukkan tegangan *Von mises* maksimum masing-masing sebesar 76,85 MPa, 101,8 MPa, dan 81,62 MPa, yang semuanya berada di bawah batas luluh material sebesar 250 MPa. Regangan maksimum yang terjadi masih berada dalam rentang elastis, dengan nilai tertinggi sebesar 77,97 MPa. Deformasi total maksimum yang diperoleh tetap kecil, kurang dari 0,6 mm pada semua kondisi pembebanan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa desain *lifting lug* yang dianalisis aman dan memiliki kekuatan struktural yang memadai untuk digunakan pada proses *dismantling chimney* secara bertahap.

Kata kunci: *Finite Element Analysis*, *lifting lug*, *dismantling chimney*, tegangan *von mises*, deformasi total.

Abstract: The dismantling process of industrial chimneys requires a safe and reliable lifting system, in which the lifting lug serves as a critical component for transferring loads to lifting equipment. Improper lifting lug design may lead to significant safety risks during the lifting of segmented structures. This study aimed to evaluate the structural strength of a lifting lug design used in a staged chimney dismantling process using Finite Element Analysis (FEA). The chimney was divided into three loading conditions representing different segment masses, namely segments 1–5, 6–14, and 15–23. The analysis was conducted using SolidWorks Simulation with ASTM A36 structural steel under static loading assumptions. The evaluated output parameters included Von mises stress, Von mises strain, and total deformation. The simulation results showed maximum Von mises stresses of 76.85 MPa, 101.8 MPa, and 81.62 MPa, all of which were below the material yield strength of 250 MPa. The maximum strain values remained within the elastic range, with the highest value reaching 77.97 MPa. The total deformation remained small, with maximum displacement values below 0.6 mm for all loading conditions. These results indicate that the analyzed lifting lug design is structurally safe and suitable for application in staged chimney dismantling operations.

Keywords: *Finite Element Analysis*; *lifting lug*; *chimney dismantling*; *von mises stress*; *total deformation*.

© 2025, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Proses pengangkatan struktur berat seperti *chimney* pada industri umumnya memanfaatkan *lifting lug* sebagai titik angkat yang menghubungkan sistem rigging dengan beban. *Lifting lug* berfungsi mentransfer beban dari struktur ke alat angkat sehingga perannya sangat penting dalam memastikan keamanan selama proses pengangkatan. Komponen ini harus dirancang untuk menahan beban statis maupun dinamis tanpa mengalami kegagalan material, karena pembebanan akan menimbulkan tegangan dan deformasi yang signifikan pada struktur *lug* itu sendiri. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *Finite Element Analysis* (FEA) dalam evaluasi komponen teknik mampu memberikan gambaran yang

akurat mengenai respons struktural akibat variasi beban dan geometri, sehingga metode ini sesuai untuk menganalisis elemen struktural seperti *lifting lug* [1].

Finite Element Analysis adalah pendekatan numerik yang memecah struktur kompleks menjadi elemen kecil untuk menganalisis respons terhadap beban. Metode ini telah banyak diterapkan dalam penelitian teknik untuk menentukan distribusi tegangan *von mises* dan deformasi total pada berbagai komponen, seperti sistem penyimpanan syngas, sasis kendaraan, dan elemen struktural lainnya. Hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa FEA efektif dalam memprediksi perilaku mekanis struktur di bawah kondisi pembebanan tertentu. Oleh

karena itu, *FEA* menjadi metode yang relevan untuk digunakan dalam analisis kekuatan *lifting lug* [2], [3].

Dalam konteks pemindahan dan pembongkaran *chimney* yang dilakukan secara bertahap, *lifting lug* memegang peranan penting dalam menentukan titik angkat yang aman. Setiap segmen *chimney* memiliki massa yang berbeda sehingga beban yang diterima *lifting lug* juga bervariasi, yang berdampak langsung pada distribusi tegangan dan deformasi. Penelitian pada aplikasi serupa, seperti pengangkatan blok kapal, menunjukkan bahwa geometri *lifting lug* sangat memengaruhi nilai tegangan maksimum dan deformasi yang terjadi selama proses *lifting*. Oleh karena itu, desain *lifting lug* harus mempertimbangkan kondisi beban aktual agar risiko kegagalan struktural dapat dihindari [1], [4].

Batasan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada analisis respons struktural *lifting lug* menggunakan metode *FEA* dengan kondisi pembebanan statis yang merepresentasikan beban angkat *chimney*. Penelitian ini tidak mempertimbangkan pengaruh beban dinamis, variasi temperatur, maupun interaksi detail antara *lug* dengan *sling* dan perangkat angkat lainnya. Parameter yang dianalisis dibatasi pada tegangan *von mises*, regangan *von mises*, dan deformasi total pada *lifting lug*. Pembatasan tersebut ditetapkan untuk menjaga konsistensi metodologi serta memfokuskan interpretasi hasil analisis numerik [5].

Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktural desain *lifting lug* pada proses *dismantling chimney* secara bertahap dengan menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Analisis dilakukan untuk memperoleh distribusi tegangan *von mises*, regangan *von mises*, dan deformasi total yang terjadi pada *lifting lug* akibat pembebanan angkat. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi desain *lifting lug* yang lebih aman. Selain itu, penelitian ini diharapkan menjadi referensi bagi pengembangan dan evaluasi komponen pengangkat struktural pada aplikasi industri sejenis [6].

DASAR TEORI

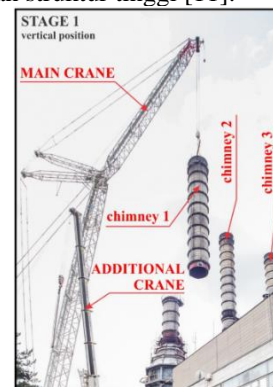
Chimney

Chimney atau cerobong asap industri adalah struktur vertikal yang dirancang untuk membuang gas buangan dan partikel hasil pembakaran ke ketinggian tertentu sehingga konsentrasi polutan di area kerja dan permukaan tanah dapat diminimalkan; fungsi ini menuntut dimensi dan konfigurasi cerobong yang disesuaikan dengan karakteristik aliran buang dan batasan lingkungan setempat, termasuk ketinggian, diameter keluaran, dan kecepatan aliran gas. Selain fungsi pembuangan, cerobong juga berperan dalam pengendalian emisi melalui desain dan perangkat tambahan, sehingga aspek desain cerobong sering dikaitkan langsung dengan standar pengendalian pencemaran udara industri [7].

Cerobong industri umumnya dibuat dari material baja, beton bertulang, atau material komposit, yang pemilihannya bergantung pada tinggi struktur, beban termal dan mekanis, serta ketahanan terhadap korosi. Setiap jenis *chimney* memiliki karakteristik struktural yang berbeda terhadap beban angin, gempa, dan kondisi operasi jangka panjang. Tantangan struktural dapat muncul selama masa operasi, seperti getaran dan degradasi material, maupun saat proses *dismantling*. Pada tahap *dismantling*, perbedaan massa tiap segmen dan konsentrasi tegangan pada titik angkat menjadi faktor penting yang harus diperhitungkan secara teknis dan keselamatan [8], [9].

Proses *Dismantling Chimney*

Proses *dismantling chimney* atau pembongkaran cerobong industri merupakan bagian dari *demolition* struktur tinggi yang dilakukan ketika cerobong telah mencapai akhir masa layan atau memerlukan penggantian. Proses ini umumnya dilakukan secara terencana dan terkontrol dari bagian atas ke bawah guna meminimalkan risiko runtuh tidak terkendali [10]. Dalam praktik *demolition* teknik sipil, pembongkaran struktur tinggi biasanya menerapkan metode bertahap seperti *top-down* manual atau mekanis. Meskipun pembahasan spesifik mengenai *chimney* masih terbatas dalam literatur nasional, prinsip keselamatan dan pengendalian dampak lingkungan tetap menjadi acuan utama dalam pembongkaran struktur tinggi [11].



Gambar 1. Proses *Dismantling Chimney*
Sumber: [12]

Metode *dismantling* cerobong sering kali berupa pembongkaran bertahap (*segmentation*) di mana struktur cerobong dipecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil untuk kemudian diangkat atau diturunkan satu per satu, berbeda dengan *implosive demolition* atau peledakan yang lebih sering digunakan pada bangunan besar tanpa mempertimbangkan potensi kerusakan di sekitarnya; studi *monitoring* terhadap proses peledakan dan runtuhnya cerobong beton menunjukkan bagaimana kerusakan progresif, variasi distribusi massa, dan respons dinamis struktur selama runtuh merupakan faktor fundamental yang mempengaruhi keselamatan dan perencanaan *dismantling* [13].

Lifting Lug

Lifting lug merupakan komponen struktural berupa pelat logam yang berfungsi sebagai titik angkat untuk menghubungkan beban dengan alat angkat seperti *sling*, *shackle*, atau *crane* sehingga gaya angkat dapat ditransfer secara aman dan terkontrol ke struktur utama. Komponen ini dirancang untuk meminimalkan konsentrasi tegangan serta memudahkan perencanaan sistem *rigging* sebelum proses pengangkatan dilakukan [4]. Jenis *lifting lug* yang umum digunakan meliputi *pad eye* atau *cheek plate*, *welded lug* yang dilas langsung pada struktur, serta *bolted lug* yang dipasang menggunakan baut, dengan prinsip kerja memikul gaya angkat melalui sambungan yang kuat dan geometri yang sesuai. Variasi geometri seperti ketebalan pelat, diameter lubang, dan posisi *lug* sangat memengaruhi distribusi tegangan dan berpotensi menyebabkan kegagalan berupa *yielding*, *fracture* di sekitar lubang, atau *excessive deformation* terutama pada area sambungan las jika desain dan proses fabrikasi tidak tepat [14], [15].

Material Lifting Lug

Material *lifting lug* umumnya menggunakan baja struktural ASTM A36 yang dikenal sebagai baja karbon rendah dengan sifat yang cocok untuk aplikasi struktural, terutama untuk komponen yang menahan beban berat. Sifat mekanik tipikal yang dipakai dalam simulasi meliputi Modulus Elastisitas, *Poisson's ratio*, *yield strength*, dan densitas, nilai-nilai ini menjadikan A36 layak untuk aplikasi struktural yang menerima beban statis menengah sampai berat [16]. Studi eksperimen dan karakterisasi material di lingkungan Indonesia menunjukkan konsistensi sifat mekanik dasar ASTM A36 pada sampel pelat dan pengaruh perlakuan panas/pengelasan terhadap performa mekanisnya, sehingga parameter standar tersebut dapat dijadikan acuan awal dalam simulasi *FEA* [17].

Tabel I. Sifat Kimia ASTM A36

Properti	Komposisi (wt%)	Properti	Komposisi (wt%)
Fe	98,0	Cu	0,20
C	0,27	S	0,050
Mn	1,03	P	0,040
Si	0,28		

Sumber: [16]

Tabel II. Sifat Mekanik ASTM A36

Properti	Nilai	Satuan	Keterangan
<i>Density</i>	7,850	Kg/m ³	Massa jenis
<i>Young's Modulus</i>	200 × 10 ⁹	Mpa	Modulus elastisitas
<i>Tensile Strength (Ultimate)</i>	400-500	Mpa	Kekuatan tarik maksimum
<i>Yield Strength (σ_y)</i>	250	Mpa	Batas elastis/tegangan luluh
<i>Shear Modulus (G)</i>	78 × 10 ⁹	Pa (N/m ²)	Modulus geser

Sumber: [18]

Peran sifat material sangat krusial pada respons struktural *lifting lug*. Dalam analisis numerik seperti *FEA*, sifat mekanik ini menjadi dasar untuk

memodelkan respons tegangan dan regangan struktur bawah beban. Modulus elastisitas mengukur kekakuan material dalam fasa elastis, sedangkan rasio *Poisson* menggambarkan hubungan lateral-aksial saat baja menerima beban, yang penting dalam prediksi deformasi komponen *lifting lug* di bawah tegangan *von mises* dan total deformasi [19]. Perilaku material di bawah beban asumsi biasanya diasumsikan isotropik dan homogen, yang merupakan asumsi umum dalam simulasi *FEA* untuk baja struktural karena baja karbon rendah seperti A36 cenderung menunjukkan perilaku yang mendekati kondisi ini pada tingkat makro dalam *domain* elastisnya [20].

Finite Element Analysis (FEA)

Finite Element Analysis (FEA) atau Metode Elemen Hingga adalah teknik numerik untuk memodelkan dan menganalisis perilaku struktur yang geometri dan kondisi bebannya kompleks dengan membagi struktur kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada struktur yang tidak memungkinkan dianalisis secara analitik misalnya komponen mekanik dengan bentuk tidak beraturan atau beban kompleks [21]. *FEA* telah menjadi metode standar dalam desain dan analisis komponen mekanik maupun struktural, termasuk pada kendaraan dan sistem transportasi, karena mampu memberikan prediksi awal sebelum produksi fisik dilakukan [22].

Prosedur umum *FEA Static Structural* meliputi;

- 1) *Setting Material*
- 2) *Input Geometri 3D Model*
- 3) *Meshing*
- 4) *Boundary Conditions*
- 5) *Solving*
- 6) *Result Evaluation*

Proses ini memungkinkan desainer melakukan *what if analysis*, membandingkan alternatif desain hanya dengan simulasi komputer tanpa harus membuat *prototype* fisik sehingga efisien dari segi waktu dan biaya [23].

Parameter Hasil FEA

Finite Element Analysis menghasilkan berbagai parameter hasil yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktural suatu komponen terhadap beban yang diterapkan. Tiga parameter utama dalam analisis struktur teknik adalah tegangan *Von mises*, regangan *Von mises*, dan *total deformation* yang masing-masing menjadi dasar penilaian keamanan desain dan batas elastis material.

1. Tegangan *Von mises (Von mises Stress)*

Tegangan *Von mises* atau *equivalent stress* merupakan parameter utama dalam hasil analisis *FEA* yang digunakan untuk mengevaluasi apakah material telah mencapai atau mendekati batas lelehnya ketika menerima beban kompleks. Kriteria *Von mises* sering dipakai dalam analisis struktur untuk material daktail

karena memberikan nilai tegangan ekuivalen tunggal yang dapat dibandingkan langsung dengan *yield strength* material tersebut, sehingga memudahkan penilaian keamanan desain [24].

$$\sigma_e = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Sumber: [25]

Di mana:

σ = tegangan normal (Pa)

τ = tegangan geser (Pa)

Persamaan ini merumuskan tegangan *Von mises* (σ_e) sebagai fungsi dari komponen tegangan normal dan geser dalam tiga sumbu utama.

2. Regangan *Von mises* (*Von mises Strain*)

Regangan *Von mises* adalah ukuran ekuivalen dari deformasi yang dialami material akibat tegangan yang bekerja, dan sering digunakan dalam *FEA* untuk menilai respons deformasi sebelum terjadinya plastisitas. Nilai *strain* ini membantu memahami bagaimana material berubah bentuk relatif terhadap keadaan awalnya ketika diberi beban, serta dapat digunakan untuk menilai apakah struktur masih dalam perilaku elastis atau telah memasuki fase plastis [26].

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+v} \left[\frac{1}{2} (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Sumber: [25]

Di mana:

ε = regangan normal (Pa)

v = *poisson's ratio*

Persamaan ini mengkuantifikasi regangan ekuivalen (ε_e) berdasarkan komponen regangan normal dan geser dalam sistem tiga dimensi.

3. *Total Deformation*

Total deformasi atau *total deformation* dalam analisis *FEA* mengukur perubahan posisi setiap titik pada model dari kondisi awal hingga kondisi setelah pembebanan, yang mencakup seluruh komponen deformasi dalam sumbu X, Y, dan Z. Deformasi ini memberikan gambaran nyata tentang seberapa besar struktur berubah bentuk akibat beban yang diterapkan yang sangat penting dalam mengevaluasi kinerja struktural komponen teknik [27].

$$TD = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

Sumber: [28]

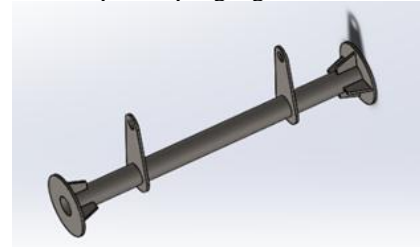
Persamaan ini menghitung deformasi total sebagai akar kuadrat dari jumlah kuadrat komponen deformasi di setiap sumbu kartesian.

METODE

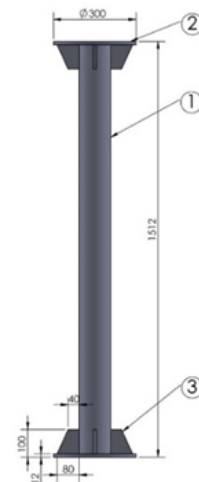
Metode penelitian ini mencakup rangkaian tahapan yang dilakukan untuk menganalisis kekuatan struktural *lifting lug* menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*. Proses penelitian dimulai dari pembuatan model geometri *lifting lug*, penentuan material dan sifat mekanik, persiapan *mesh*, penetapan kondisi batas serta pembebanan, hingga pelaksanaan analisis statis menggunakan *Solidworks Simulation*. Setiap langkah dirancang untuk memastikan bahwa model dianalisis dalam kondisi yang sesuai dengan realita, sehingga hasil analisis terhadap parameter *Equivalent Stress* (*Von mises*), *Equivalent Strain* (*Von mises*), dan *Total deformation* dapat diperoleh secara objektif dan akurat.

Desain dan Model Geometri *Lifting Lug*

Lifting lug berfungsi sebagai titik angkat utama yang menghubungkan struktur *chimney* dengan sistem rigging selama proses *dismantling*, sehingga beban dari setiap segmen *chimney* dapat ditransfer secara aman ke alat angkat. Pada proses *dismantling chimney*, *lifting lug* harus mampu menahan gaya angkat statis yang bekerja selama pemisahan dan pemindahan tiap segmen. Desain *lifting lug* yang dianalisis pada penelitian ini ditujukan untuk memastikan distribusi tegangan yang merata dan menghindari konsentrasi tegangan berlebih. Oleh karena itu, desain *lifting lug* menjadi elemen kritis dalam menjamin keselamatan dan keandalan proses pengangkatan.



Gambar 2. Model 3D *Lifting Lug*
Sumber: Penulis



Gambar 3. Desain 2D *Lifting Lug*
Sumber: Penulis

Tabel III. Keterangan Desain 2D *Lifting Lug*

No	Item	Material
1	Pipa	ASTM A36 4" SCH 40
2	Flange	ASTM A36 12mm
3	Stiffener	ASTM A36 12mm

Sumber: Penulis

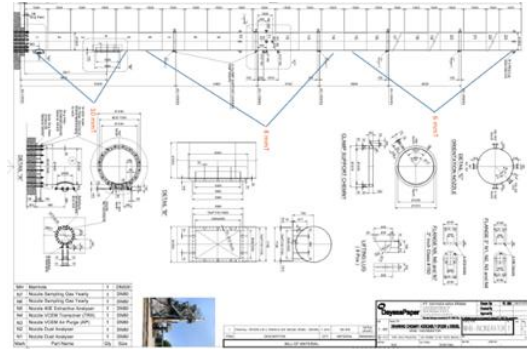
Konfigurasi desain *lifting lug* yang dianalisis berupa pelat baja dengan satu lubang angkat yang disesuaikan dengan sistem pengait *crane*. Parameter geometrik utama yang diperhatikan meliputi ketebalan pelat *lug*, diameter lubang angkat, serta lebar *lug* yang berpengaruh langsung terhadap kapasitas beban dan distribusi tegangan. Untuk keperluan analisis *FEA*, geometri *lifting lug* disederhanakan dengan menghilangkan detail kecil yang tidak signifikan terhadap respons struktural. Penyederhanaan ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi komputasi tanpa mengurangi akurasi hasil analisis tegangan dan deformasi.

Pemilihan Material

Material merupakan aspek penting dalam analisis struktural *lifting lug* karena sifat mekaniknya sangat memengaruhi respons struktur terhadap pembebanan selama proses pengangkatan. Pada penelitian ini digunakan baja karbon ASTM A36 yang umum diaplikasikan pada komponen struktural dan sistem pengangkatan karena memiliki kombinasi kekuatan, daktilitas, kemudahan fabrikasi, serta ketersediaan yang luas di industri. Sifat mekanik material yang digunakan dalam simulasi meliputi Modulus Elastisitas, *Poisson's Ratio*, *Yield Strength*, dan *Density* sebagaimana ditampilkan pada Tabel II, yang berfungsi untuk merepresentasikan perilaku material secara realistis dalam analisis numerik. Parameter tersebut menjadi dasar perhitungan tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi pada *lifting lug* ketika menerima beban angkat *chimney*, sehingga memungkinkan evaluasi kekuatan dan keamanan desain secara akurat.

Beban *Chimney* pada Proses *Dismantling*

Proses *dismantling chimney* dilakukan secara bertahap untuk mengurangi risiko kegagalan struktural dan meningkatkan keselamatan selama pengangkatan. Metode ini melibatkan pemisahan struktur *chimney* menjadi beberapa bagian yang lebih kecil agar beban angkat dapat dikendalikan dengan lebih aman. Pada penelitian ini, *chimney* dibongkar secara berurutan dari bagian atas ke bawah menggunakan sistem *lifting*. Pendekatan *dismantling* bertahap memungkinkan analisis beban angkat yang lebih terkontrol pada setiap tahapan pengangkatan.

**Gambar 4.** Desain 2D *Chimney*

Sumber: Penulis

Chimney pada penelitian ini dibagi menjadi tiga segmen utama dengan massa yang berbeda sesuai dengan distribusi geometrinya. Setiap segmen memiliki berat sendiri yang menghasilkan gaya angkat berbeda yang harus ditahan oleh *lifting lug*. Besar gaya angkat ditentukan berdasarkan massa masing-masing segmen dengan mempertimbangkan percepatan gravitasi sebagai gaya utama yang bekerja. Arah gaya pembebanan diasumsikan vertikal ke bawah dan diterapkan pada *lifting lug* sebagai representasi beban akibat berat segmen *chimney*.

Tabel IV. Tonase *Chimney*

<i>Chimney</i>	Tebal Plat (mm)	Dimensi (m)		Berat (kg)
		P	L	
Segmen 1-5	10	3,7	1,5	2178,38
Segmen 6-14	8	3,7	1,5	3136,86
Segmen 15-23	6	3,7	1,5	2352,65

Sumber: Penulis

Dalam analisis ini, proses pengangkatan diasumsikan berlangsung dalam kondisi pembebanan statis. Pengaruh beban dinamis akibat percepatan pengangkatan, ayunan beban, dan efek kejutan tidak diperhitungkan dalam simulasi. Asumsi pembebanan statis dipilih untuk menyederhanakan analisis serta memfokuskan evaluasi pada respons struktural dasar *lifting lug*. Pendekatan ini dianggap cukup representatif untuk menilai distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi selama proses *lifting chimney*.

Boundary Conditions dan Pembebanan

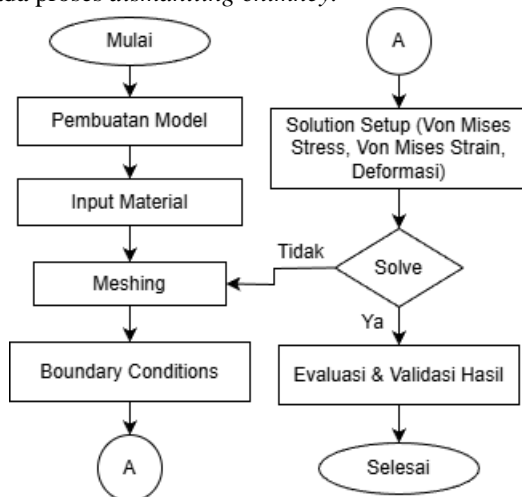
Model *lifting lug* dianalisis menggunakan metode elemen hingga dengan penerapan *boundary conditions* yang merepresentasikan kondisi pengangkatan aktual pada proses *dismantling chimney*. Gaya angkat diterapkan pada kedua sisi klem yang terhubung dengan *crane* sebagai representasi distribusi gaya dari sistem *rigging*, dengan arah gaya mengikuti sumbu pengangkatan vertikal. Besar gaya disesuaikan dengan berat masing-masing segmen *chimney*, yaitu sebesar ± 21.367 N untuk segmen 1–5, ± 30.772 N untuk segmen 6–14, dan ± 23.074 N untuk segmen 15–23. Untuk meningkatkan akurasi hasil, dilakukan *mesh refinement* pada area kritis di sekitar lubang *lug* dan

titik pembebanan guna menangkap distribusi tegangan secara lebih detail.

Area lubang *lifting lug* yang terhubung dengan *chimney* ditetapkan sebagai *fixed support* untuk merepresentasikan kondisi keterikatan *lug* terhadap struktur selama proses *lifting*, dengan asumsi tidak terjadi perpindahan translasi maupun rotasi. Sambungan antara *lifting lug* dan sistem *rigging* dimodelkan sebagai hubungan kaku (*bonded*) tanpa mempertimbangkan efek gesekan atau kelonggaran. Kendala gerak pada model sepenuhnya dibatasi oleh kondisi *boundary condition* yang ditetapkan, sementara pengaruh beban dinamis dan kontak nonlinier tidak dimasukkan dalam analisis. Pendekatan ini digunakan untuk menyederhanakan model dan memfokuskan evaluasi pada respons tegangan dan deformasi *lifting lug* akibat beban angkat statis.

Prosedur Analisis

Analisis kekuatan *lifting lug* dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* dengan pendekatan *Finite Element Analysis (FEA)*. Tahapan analisis dimulai dari pembuatan model tiga dimensi *lifting lug* sesuai desain, dilanjutkan dengan penetapan material baja struktural ASTM A36. Selanjutnya dilakukan proses *meshing* untuk membagi model menjadi elemen hingga, dengan pemadatan *mesh* pada area kritis seperti lubang *lug* dan titik pembebanan. *Boundary condition* serta pembebanan kemudian diterapkan sesuai kondisi pengangkatan pada proses *dismantling chimney*.



Gambar 5. Diagram Alir Analisis
Sumber: Penulis

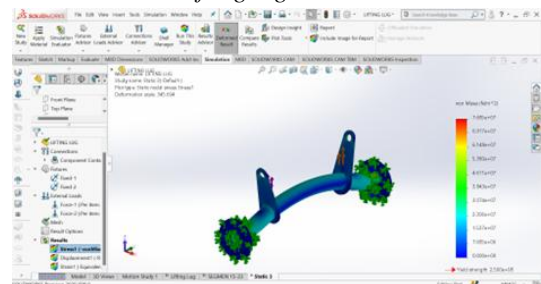
Proses *solving* dilakukan untuk menghitung respons struktural akibat pembebanan yang diberikan. Evaluasi hasil dilakukan pada tahap *post-processing* dengan meninjau parameter utama berupa tegangan *Von Mises*, regangan *Von Mises*, dan deformasi total. Distribusi tegangan dan deformasi dianalisis untuk mengidentifikasi area kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar penilaian kekuatan dan keamanan desain *lifting lug* pada proses pengangkatan *chimney*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis dan pembahasan disajikan untuk memberikan gambaran mengenai respons struktural *lifting lug* pada proses *dismantling chimney* yang dianalisis menggunakan metode *FEA*. Evaluasi dilakukan berdasarkan hasil simulasi numerik yang merepresentasikan kondisi pembebanan pada setiap segmen *chimney* yang dibongkar secara bertahap. Parameter utama yang ditinjau meliputi tegangan *Von mises*, regangan *Von mises*, dan deformasi total sebagai indikator kinerja struktural dan tingkat keamanan desain. Interpretasi hasil dilakukan dengan membandingkan nilai-nilai yang diperoleh terhadap batas elastis material ASTM A36 guna menilai kelayakan *lifting lug* pada kondisi pengangkatan yang dianalisis.

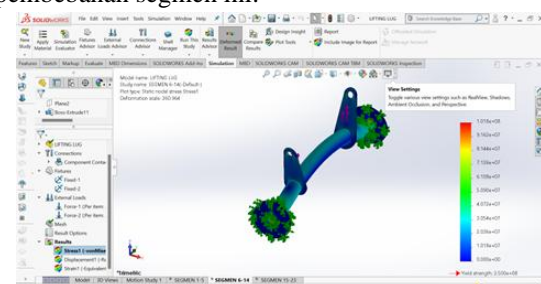
Tegangan *Von mises* (*Von mises Stress*)

Analisis tegangan *Von Mises* dilakukan untuk menilai kekuatan struktural *lifting lug* pada setiap tahapan *dismantling chimney*. Simulasi dilakukan pada tiga kondisi pembebanan yang merepresentasikan perbedaan massa segmen *chimney*. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi distribusi dan nilai tegangan maksimum serta membandingkannya dengan *yield strength* material ASTM A36 guna menilai keamanan desain *lifting lug*.



Gambar 6. Kontur Tegangan Segmen 1-5
Sumber: Penulis

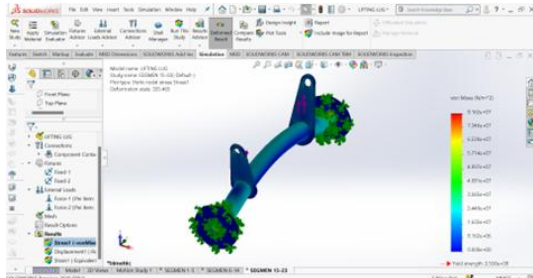
Pada segmen 1–5, hasil simulasi menunjukkan nilai tegangan *Von mises* maksimum sebesar 76,85 MPa. Konsentrasi tegangan tertinggi terjadi di sekitar area lubang *lifting lug* yang berfungsi sebagai titik transfer gaya angkat. Nilai tegangan ini berada jauh di bawah *yield strength* material ASTM A36 sebesar 250 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur *lifting lug* masih bekerja dalam daerah elastis pada pembebanan segmen ini.



Gambar 7. Kontur Tegangan Segmen 6-14
Sumber: Penulis

Pada segmen 6–14, nilai tegangan *Von mises* maksimum meningkat menjadi 101,8 MPa akibat

perbedaan distribusi beban yang bekerja pada *lifting lug*. Konsentrasi tegangan tetap terlokalisasi di area sekitar lubang *lug*. Meskipun mengalami peningkatan dibandingkan segmen sebelumnya, nilai tegangan ini masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36. Hal ini menunjukkan bahwa *lifting lug* tidak mengalami risiko deformasi plastis pada kondisi pembebanan ini.

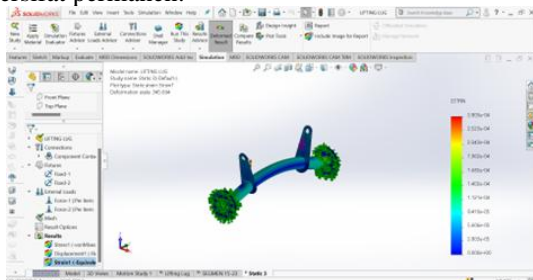


Gambar 8. Kontur Tegangan Segmen 15-23
Sumber: Penulis

Pada segmen 15–23, nilai tegangan *Von mises* maksimum yang diperoleh sebesar 81,62 MPa. Distribusi tegangan menunjukkan pola yang serupa dengan segmen lainnya, dengan konsentrasi pada area lubang *lug* namun dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan segmen 6–14. Seluruh nilai tegangan berada di bawah *yield strength* material ASTM A36. Hasil analisis tegangan *Von mises* menunjukkan bahwa desain *lifting lug* aman pada semua tahapan *dismantling chimney*.

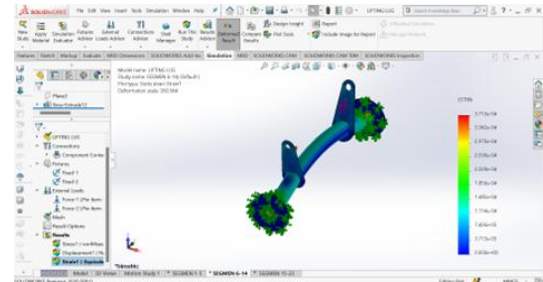
Regangan *Von mises* (*Von mises Strain*)

Analisis regangan *Von Mises* dilakukan untuk mengevaluasi respons deformasi material *lifting lug* akibat pembebanan selama proses *dismantling chimney*. Regangan *Von Mises* digunakan sebagai indikator untuk menilai apakah material masih berada dalam kondisi elastis. Hasil simulasi menunjukkan pola distribusi regangan yang serupa dengan tegangan, dengan konsentrasi di sekitar lubang *lug*, sehingga dapat dipastikan bahwa deformasi yang terjadi tidak bersifat permanen.



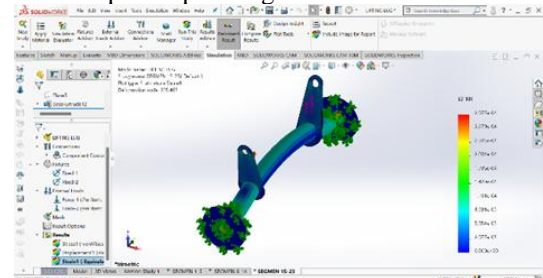
Gambar 9. Kontur Regangan Segmen 1-5
Sumber: Penulis

Pada segmen 1–5, hasil simulasi menunjukkan nilai regangan *Von mises* maksimum sebesar 58,86 MPa. Regangan tertinggi terjadi pada area sekitar lubang *lifting lug* sebagai titik transfer gaya angkat. Nilai regangan tersebut masih berada di bawah batas regangan elastis material. Hal ini menunjukkan bahwa *lifting lug* bekerja dalam kondisi elastis pada pembebanan segmen ini.



Gambar 10. Kontur Regangan Segmen 6-14
Sumber: Penulis

Pada segmen 6–14, nilai regangan *Von mises* maksimum yang diperoleh sebesar 77,97 MPa. Regangan tertinggi kembali terlokalisasi pada area sekitar lubang *lug*. Meskipun mengalami peningkatan dibandingkan segmen 1–5, nilai ini masih berada jauh di bawah batas elastis material ASTM A36 sebesar 250 MPa. Dengan demikian, tidak terdapat indikasi deformasi plastis pada segmen ini.

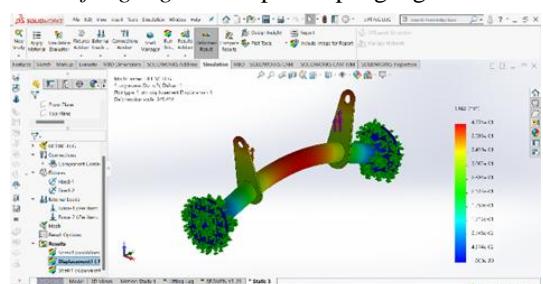


Gambar 11. Kontur Regangan Segmen 15-23
Sumber: Penulis

Pada segmen 15–23, hasil simulasi menunjukkan nilai regangan *Von mises* maksimum sebesar 62,5 MPa. Pola distribusi regangan menunjukkan konsentrasi di area lubang *lug* dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan segmen 6–14. Seluruh nilai regangan masih berada dalam rentang elastis material. Hasil analisis regangan *Von mises* menegaskan bahwa *lifting lug* tidak mengalami deformasi permanen selama proses *dismantling chimney*.

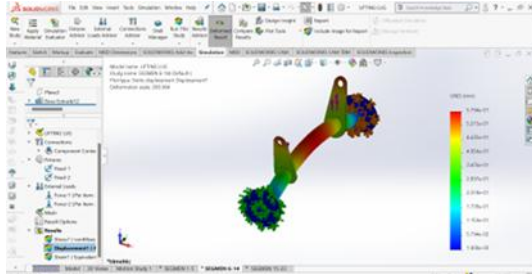
Total Deformation

Analisis deformasi total dilakukan untuk mengevaluasi perubahan bentuk *lifting lug* akibat pembebanan selama proses *dismantling chimney*. Parameter ini menunjukkan besar perpindahan maksimum struktur dari posisi awal sebagai indikator kekakuan. Hasil simulasi deformasi total digunakan untuk menilai potensi gangguan fungsi serta keamanan desain *lifting lug* selama proses pengangkatan.



Gambar 12. Kontur Deformasi Segmen 1-5
Sumber: Penulis

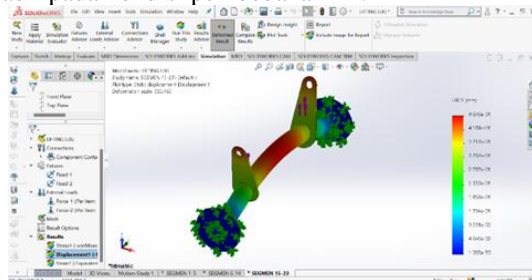
Pada segmen 1–5, hasil simulasi menunjukkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0,4374 mm. Deformasi terbesar terjadi pada area titik kerja gaya angkat. Nilai deformasi yang terjadi relatif kecil, yaitu kurang dari 1 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa *lifting lug* memiliki kekakuan yang baik pada pembebanan segmen ini.



Gambar 13. Kontur Deformasi Segmen 6-14

Sumber: Penulis

Pada segmen 6–14, nilai deformasi total maksimum yang diperoleh sebesar 0,5794 mm. Area dengan deformasi tertinggi ditunjukkan oleh kontur berwarna merah, namun masih berada dalam kisaran deformasi kecil. Nilai deformasi ini menunjukkan bahwa perubahan bentuk struktur tetap terbatas. Dengan demikian, *lifting lug* masih bekerja secara stabil pada kondisi pembebanan ini.



Gambar 14. Kontur Deformasi Segmen 15-23

Sumber: Penulis

Pada segmen 15–23, hasil simulasi menunjukkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0,4646 mm. Pola deformasi serupa dengan segmen lainnya, dengan konsentrasi pada area titik angkat. Besarnya deformasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa struktur tetap kaku dan stabil. Secara keseluruhan, hasil analisis deformasi total menegaskan bahwa desain *lifting lug* memiliki kekakuan yang memadai dan aman digunakan pada seluruh tahapan *dismantling chimney*.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *Finite Element Analysis (FEA)* terhadap desain *lifting lug* pada proses *dismantling chimney*, dapat disimpulkan bahwa *lifting lug* yang dianalisis mampu menahan beban angkat secara aman pada seluruh tahapan pembongkaran. Simulasi menunjukkan bahwa *Von mises* maksimum terjadi pada segmen 6–14 sebesar 101,8 MPa, lebih tinggi dibandingkan segmen 1–5 sebesar 76,85 MPa dan segmen 15–23 sebesar 81,62 MPa, namun seluruh nilai tersebut masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa. Analisis regangan *Von mises* menunjukkan nilai maksimum sebesar 77,97 MPa pada segmen 6–14,

58,86 MPa pada segmen 1–5, dan 62,5 MPa pada segmen 15–23, yang mengindikasikan bahwa material tetap bekerja dalam kondisi elastis tanpa mengalami deformasi plastis. Selain itu, hasil analisis deformasi total menunjukkan perpindahan maksimum yang relatif kecil, yaitu masing-masing sebesar 0,5794 mm, 0,4374 mm, dan 0,4646 mm, sehingga dapat disimpulkan bahwa desain *lifting lug* memiliki kekakuan yang memadai dan aman digunakan pada proses *dismantling chimney* secara bertahap.

REFERENSI

- [1] S. Xuan, J. Gao, Q. Zhang, dan C. Zhang, "Finite Element Analysis and Optimization Design of Automobile Exhaust Pipe Lifting Lugs," *J. Eng. Mech. Mach.*, vol. 8, no. 3, hal. 1–6, 2023, doi: 10.23977/jemm.2023.080301.
- [2] D. A. Erdianto, S. Mujiarto, R. M. Sulistiyono, A. R. Saleh, dan T. R. Setiyawati, "Analisis Kekuatan Struktur Sistem Penyimpanan Syngas dengan Metode Finite Element Analysis," *J. Inov. Glob.*, vol. 3, no. 6, hal. 879–887, 2025.
- [3] R. D. Sampurno dkk., "Simulasi Finite Element pada Alat Hydraulic Scissor Lift Mobil," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 25, no. 1, hal. 33–38, 2025.
- [4] A. M. N. Arifuddin dkk., "Effect of Lifting Lug Hole Diameter Size on Strength Performance in Ship Block Lifting Process," *Indones. J. Marit. Technol.*, vol. 3, no. 1, hal. 42–49, 2025.
- [5] M. Perkasa, "Analisis Kekuatan Struktur Beam Skid Base dengan Metode Elemen Hingga (FEM)," *J. Tek. Mesin CAKRAM*, vol. 4, no. 2, hal. 96–103, 2021.
- [6] W. Suryawan, P. Basuki, C. Wahyu, J. Jefry, dan M. Sagaf, "Desain Adjustable Spreader Bar Telescopic Menggunakan ANSYS," *J. Penelit. Rumpun Ilmu Tek.*, vol. 4, no. 3, hal. 1–11, 2025.
- [7] M. A. Caronge, M. W. Tjarong, dan R. Irmawaty, "Analisis Tingkat Emisi pada Cerobong Asap Pabrik Semen Tonasa Pangkep," *J. Purifikasi*, vol. 18, no. 2, hal. 87–92, 2018.
- [8] G. A. Kaligis, R. S. Windah, dan B. D. Handono, "Analisis Dinamis Chimney Beton Bertulang Akibat Variasi Percepatan Gempa," *J. TEKNO*, vol. 22, no. 88, hal. 1491–1502, 2024.
- [9] H. A. Rosydi dan F. Rosariawari, "Analisis Sebaran Emisi NH3 pada Cerobong Industri Pupuk dengan Pemodelan AERMOD," *J. EnviroUS*, vol. 4, no. 1, hal. 103–108, 2023.
- [10] Sunaryo dan O. F. Jin, "Penerapan Metode Pembongkaran (Demolishing) pada Bangunan Gedung dan Daur Ulang Limbah Bongkaran: A Systematic Literature Review," *J. Tek. Sipil*,

- vol. 14, no. 1, hal. 223–236, 2024.
- [11] Mardiaman dan F. Simarmata, “Pemilihan Metode Pembongkaran Gedung Bertingkat Menggunakan Analytical Hierarchy Process,” *e-Journal CENTECH*, vol. 2, no. 2, hal. 108–117, 2021.
- [12] Z. Petković, N. Gnjatović, I. Milenović, G. Milojević, dan A. Stefanović, “Specific Engineering Challenges During the Large-Scale Structures’ Mantling and Dismantling Procedures,” *Proc. XXI Int. Conf. MHCL’15*, hal. 1–6, 2015.
- [13] X. Huang, X. Xie, J. Sun, D. Zhong, Y. Yao, dan S. Tu, “Monitoring and Analysis of the Collapse Process in Blasting Demolition of Tall Reinforced Concrete Chimneys,” *J. Sensors*, vol. 23, no. 6240, hal. 1–14, 2023.
- [14] A. D. J. Ardianto, S. Wiratno, dan M. Fathonah, “Studi Perbandingan Desain Geometri Padeye Simetri dan Tidak Simetri,” *J. Integr.*, vol. 9, no. 2, hal. 97–105, 2017.
- [15] C. Liu, B. Liu, dan C. Ma, “Fatigue Behavior and Mechanism Study on Lugs of TC18 Titanium Alloy,” *J. Cryst.*, vol. 13, no. 1320, hal. 1–23, 2023.
- [16] M. Irfan, W. Amiruddin, dan A. W. B. Santosa, “Analisis Pengaruh Variasi Kuat Arus dan Normalizing pada Pengelasan FCAW Menggunakan Elektroda E81T-Ni1C terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Baja ASTM A36,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 12, no. 4, hal. 1–10, 2024.
- [17] A. Faza, A. Faridzi, dan Ponidi, “Ketahanan Baja ASTM A36 Terhadap Pengujian Tarik dan Bending dengan Proses Pengelasan SMAW dan Metalografi,” *J. Rekayasa Sist. Eng. dan Manufaktur*, vol. 2, no. 2, hal. 109–118, 2024.
- [18] A. Halim, I. Suryapradana, N. S. Radear, Z. S. Gheitsa, dan P. Akbar, “Analisis Struktur Rangka Box Fermentasi Biji Kakao Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 1, hal. 105–114, 2025.
- [19] A. Pradana, V. Noubnome, dan Oleh, “Analysis of The Effect of Filler Welding on ASTM A36 Steel using TIG Welding and Simulation with Solidworks,” *TRAKSI Maj. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 22, no. 2, hal. 192–212, 2022.
- [20] A. A. Arifin, I. M. L. Batan, M. Bici, A. Wahjudi, dan A. S. Pramono, “Investigation of Discrepancies in Isotropic Material and Structural Properties in Lattice Frameworks,” *J. Mech. Eng. Soc. Ind.*, vol. 5, no. 1, hal. 245–256, 2025.
- [21] M. R. B. Pradana, C. Anam, I. Yuniwati, M. Lazuardi, E. N. Sari, dan Umar, “Analisis Kekuatan Bearing pada Mesin Granulator terhadap Pembebanan Statis Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA),” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 24, no. 2, hal. 45–49, 2024.
- [22] R. Ponseka, I. Akbar, T. P. Sianipar, S. A. Valianta, dan Madagaskar, “Analisis Struktur Kursi Roda Multi Guna Menggunakan Finite Element Analisis dan Analitik,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 24, no. 2, hal. 101–109, 2024.
- [23] H. Abbas, D. Juma, dan M. M. R. Jahuddin, “Penerapan Metode Elemen Hingga untuk Desain dan Analisis Pembebanan Rangka Chassis Mobil Model Tubular Space Frame,” *ILTEK J. Teknol.*, vol. 15, no. 2, hal. 96–102, 2020.
- [24] B. Setiawan, G. Hidayat, dan T. Djunaedi, “Analisa Konstruksi Mesin Bubut Duplikat untuk Profil Kayu dengan Ukuran Kayu Diameter 15 cm dan Panjang 50 cm,” *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, hal. 128–136, 2023.
- [25] ANSYS Inc., *ANSYS: Theory Reference*. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317: ansys.com, 2025.
- [26] M. N. Rizki, A. Fikri, Faisal, dan R. A. Nanda, “Analisis von mises Stress, Strain, dan Total Deformasi pada Pelat Implan Metatarsophalangeal (MTP) dengan Material TI-6AL-4V Menggunakan Finite Element Method,” *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 12, no. 2, hal. 178–189, 2023.
- [27] C. Tabayyun, Kardiman, dan Ujiburrahman, “Analisis Frame Meja Dandori Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA),” *J. Mech. Electr. Technol.*, vol. 04, no. 02, hal. 77–87, 2025.
- [28] B. Kaur, P. Kaur, dan A. K. Jain, “Analysis of Deformation of RC Beam with Addition of Fly Ash: a Finite Element Based Modeling,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 5, hal. 6640–6649, 2020.