

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Adi Syaeful Amry Suherman

NIM : 2210311002

Program Studi : Teknik Mesin

Dengan ini menyampaikan bahwa judul skripsi "OPTIMASI DESAIN PADA *BUCKET LINK EXCAVATOR* KELAS 20 TON MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA" benar dan bebas plagiarisme dengan skor 15%. Apabila pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku. Demikian surat pernyataan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 3 Agustus 2026

Yang menyatakan,

Penulis



Adi Syaeful Amry Suherman

Pembimbing I

Pembimbing II



Nicky Yongkimandalan, S.T.,
M.M., M.T.



Muhammad Arifudin Lukmana,
S.T., M.T.

OPTIMASI DESAIN PADA BUCKET LINK EXCAVATOR KELAS 20 TON MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

by Adi Syaeful Amry Suherman

Submission date: 03-Aug-2026 03:59PM (UTC+0700)

Submission ID: 3007550008

File name: YAEFUL_AMRY_SUHERMAN_2210311002_-_Adi_Syaeful_Amry_Suherman.docx (1.73M)

Word count: 8963

Character count: 55743

OPTIMASI DESAIN PADA *BUCKET LINK* EXCAVATOR KELAS 20 TON MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Adi Syaeful Amry Suherman

ABSTRAK

Bucket link merupakan komponen struktural pada sistem *bucket linkage excavator* yang menerima pembebanan tinggi sehingga memerlukan desain yang kuat dan ringan. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan desain *bucket link excavator* kelas 20 ton menggunakan metode analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*) dan optimasi topologi berbasis *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) pada perangkat lunak *ANSYS Mechanical*. Material AISI 4140 dan AISI 4340 dibandingkan berdasarkan massa, tegangan *von Mises*, dan *safety factor*. Hasil optimasi menunjukkan konfigurasi terbaik AISI 4140 diperoleh pada *percent to retain* 74,57% dengan massa 42,11 kg, sedangkan AISI 4340 pada *percent to retain* 82,15% dengan massa 35,91 kg. Setelah mempertimbangkan aspek manufaktur, massa akhir menjadi 41,27 kg untuk AISI 4140 dan 38,52 kg untuk AISI 4340 dengan tegangan *von Mises* masing-masing sebesar 180,79 MPa dan 251,10 MPa serta *safety factor* 3,61 dan 4,07. Perbandingan desain awal dengan desain akhir menunjukkan pengurangan massa sebesar 17,86 kg (31,68%), yaitu dari 56,38 kg menjadi 38,52 kg. Berdasarkan hasilnya, material AISI 4340 layak dipertimbangkan sebagai pengganti material *bucket link* karena mampu menghasilkan massa yang jauh lebih ringan dengan performa struktur yang mirip.

Kata kunci : *bucket link*, excavator, optimasi topologi, metode elemen hingga.

DESIGN OPTIMIZATION OF A 20 TON CLASS EXCAVATOR BUCKET LINK USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Adi Syaeful Amry Suherman

ABSTRACT

The bucket link is a structural component of an excavator bucket linkage system that is subjected to high loading, requiring a design with high strength and low weight. This study aims to optimize the design of a bucket link for a 20-ton excavator using the Finite Element Analysis (FEA) method and topology optimization based on the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) approach in ANSYS Mechanical. AISI 4140 and AISI 4340 materials were compared based on mass, von Mises stress, and safety factor. The optimization results showed that the optimum configuration for AISI 4140 was achieved at a 74.57% percent-to-retain with a mass of 42.11 kg, while AISI 4340 reached the optimum configuration at an 82.15% percent-to-retain with a mass of 35.91 kg. After considering manufacturing constraints, the final masses became 41.27 kg for AISI 4140 and 38.52 kg for AISI 4340, with von Mises stresses of 180.79 MPa and 251.10 MPa, and safety factors of 3.61 and 4.07, respectively. Compared with the initial design, the final optimized design reduced the mass by 17.86 kg (31.68%), from 56.38 kg to 38.52 kg. Based on these results, AISI 4340 is considered a suitable replacement material for the bucket link because it provides a significantly lighter structure while maintaining comparable structural performance.

Keywords: bucket link, excavator, topology optimization, finite element method.

⁷ BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan pesat industri konstruksi dan pertambangan mendorong peningkatan kebutuhan akan alat berat yang efisien, tangguh, dan produktif, salah satunya *excavator*. Berdasarkan laporan (²⁹ Nugraha, G. L., Ajis, M., Adhi, H. S., and Zakaria, 2024), pasar global *hydraulic excavator* diperkirakan mencapai lebih dari USD 60 miliar pada tahun 2030, seiring dengan meningkatnya pembangunan infrastruktur dan urbanisasi di berbagai negara. Dalam sistem kerjanya, performa *excavator* sangat bergantung pada rangkaian mekanis yang disebut *bucket linkage system*, yang terdiri dari *boom*, *arm*, dan *bucket link*. Komponen *bucket link* memiliki fungsi vital sebagai penghubung utama antara *bucket* dan *hydraulic cylinder* untuk menyalurkan gaya penggalian. Kekuatan struktur pada bagian ini berperan penting dalam menjaga stabilitas gerak dan kemampuan gali, terutama ketika alat bekerja di bawah beban berat (R. B. Sarode, 2017).

Kemajuan teknologi rekayasa telah membawa perubahan besar dalam bidang desain mekanik. Penggunaan (⁴³ *Computer-Aided Design (CAD)* dan *Finite Element Method (FEM)*) kini menjadi standar dalam analisis struktur alat berat. Metode FEM memungkinkan perhitungan numerik untuk menilai distribusi tegangan, serta faktor keamanan sebelum proses manufaktur dilakukan (²⁵ Prashant I Bhandari, Mruthunjaya S Alur and Dr. S N Kurbet, 2016). Pendekatan ini memberikan keunggulan karena mampu memprediksi respons struktur secara lebih akurat terhadap kondisi pembebanan ekstrem, sehingga dapat mengurangi potensi kegagalan komponen sekaligus menekan biaya produksi. Melalui analisis ini, area dengan tegangan tinggi dan rendah dapat diidentifikasi secara jelas, yang kemudian dijadikan dasar dalam proses perbaikan maupun penyempurnaan desain.

Dari sudut pandang teori, kinerja dan ketahanan struktur *excavator* sangat ditentukan oleh seberapa baik gaya dari *tooth bucket* dialirkan ke sistem *linkage*. Tegangan *von Mises* digunakan untuk (³⁷ menentukan titik di mana material mulai mengalami deformasi plastis, sedangkan *safety factor* digunakan untuk memastikan komponen tetap bekerja dalam batas aman

terhadap kekuatan luluh material. Analisis kedua parameter ini memberikan gambaran menyeluruh tentang kemampuan struktur dalam menahan beban kerja yang kompleks serta membantu menentukan apakah desain sudah layak diproduksi atau masih perlu disempurnakan.

Tren desain alat berat saat ini menekankan pada pengembangan struktur yang ringan namun tetap memiliki kekakuan tinggi. Upaya ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi energi sekaligus memperpanjang umur pakai komponen. Optimasi desain menjadi strategi pilihan yang bertujuan mencapai keseimbangan antara kekuatan dan bobot. Melalui pendekatan ini, dimensi dan bentuk geometri komponen disesuaikan untuk menghasilkan distribusi tegangan yang merata tanpa melampaui batas kekuatan material (Wang *et al.*, 2023). Dengan dukungan metode FEM, proses optimasi dapat dilakukan secara terukur dan akurat, sehingga menghasilkan desain yang kuat secara mekanis, efisien dalam penggunaan material, dan andal saat beroperasi di lapangan.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kajian yang dilakukan lebih berfokus pada komponen utama excavator, seperti *bucket*, *boom*, dan *arm*, sedangkan penelitian yang secara khusus membahas komponen *bucket link* masih sangat terbatas. Beberapa studi yang membahas terkait penelitian ini lebih berfokus pada *excavator* berkapasitas besar, sehingga karakter struktural *excavator bucket link* kelas 20 ton belum banyak diuraikan. Padahal, komponen ini memiliki fungsi penting sebagai penerus gaya dari *arm* menuju *bucket* (R. B. Sarode, 2017). Melihat terbatasnya penelitian tersebut, studi ini menawarkan pendekatan baru melalui optimasi desain *bucket link excavator* kelas 20 dalam kondisi pembebanan statik. Pendekatan ini ditujukan untuk memperoleh distribusi tegangan *von misses*, dan *safety factor* yang paling efisien, sehingga dapat dicapai desain yang lebih ringan tanpa mengurangi kekokohan struktur.

Atas dasar latar belakang yang sudah dijelaskan, sehingga penulis mengambil judul “Optimasi Desain Pada *Bucket link Excavator* Kelas 20 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga”

⁷ 1.2 Rumusan Masalah

Atas dasar latar belakang yang telah dijabarkan pada subbab sebelumnya, maka dapat disusun rumusan masalah untuk penelitian ini sebagai berikut:

1. Berapa persen pengurangan massa *bucket link excavator* terhadap desain sebelumnya?
2. Berapa tegangan *von mises* dan nilai *safety factor* yang terjadi pada *bucket link excavator*?
3. Bagaimana perbandingan massa antara material AISI 4140 dan AISI 4340 pada desain *bucket link excavator* hasil optimasi topologi?

²² 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh hasil sebagai berikut:

1. Mengetahui pengurangan massa *bucket link excavator* terhadap desain sebelumnya.
2. Mengetahui tegangan *von mises* dan nilai *safety factor* yang terjadi pada *bucket link excavator*.
3. Mengetahui perbandingan massa antara material AISI 4140 dan AISI 4340 pada desain *bucket link excavator* hasil optimasi topologi.

⁷ 1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan tidak meluas dari ruang lingkup utama, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada komponen *bucket link*.
2. Posisi yang ditinjau hanya pada kondisi *compression* dan *tension*.
3. *Software CAD* yang digunakan adalah *Solidworks*.
4. Peneliti menggunakan simulasi *static structural Ansys Workbench R1* dalam melakukan optimasi pada *bucket link*.
5. Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu AISI 4140 dan AISI 4340.

6. Desain *bucket link* pada penelitian ini diperoleh melalui proses pengukuran langsung pada unit excavator yang ada di lapangan.
7. Parameter yang dikontrol pada proses optimasi adalah massa.
8. Mengabaikan pengelasan.
9. Mengabaikan biaya produksi *bucket link*.

13

1.5 Sistematika Penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi studi literatur mengenai teori dasar yang digunakan dan penelitian relevan.

14

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi diagram alir penelitian, spesifikasi perangkat komputer yang digunakan, serta prosedur dalam menjalankan penelitian.

28

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil dari penelitian yang telah dijalankan dan pembahasan terkait hasil dan korelasinya dengan rumusan masalah.

BAB 5 KESIMPULAN

Berisi hasil rangkuman dari penelitian yang telah dijalankan dan mengacu pada hasil yang di dapat serta memberikan saran untuk penelitian berikutnya. Bab ini memberikan jawaban terkait rumusan masalah dan tujuan penelitian.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Kajian penelitian terdahulu dilakukan untuk mengetahui temuan serta pendekatan yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Sebagaimana digambarkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1. Penelitian Terdahulu

Penulis	Tahun	Objek	Metode	Software	Hasil
R. B. Sarode and S. S. Sarawade	2017	<i>Bucket link excavator</i>	Metode elemen hingga	CATIA V5	Massa turun 7,34 kg, tegangan aman.
R. B. Sarode and S. S. Sarawade	2016	<i>Bucket link excavator</i>	Metode elemen hingga	CATIA V5	Tegangan maksimum sebesar 763,41 MPa
Zhang et al.	2026	<i>Arm excavator</i>	Metode elemen hingga	Altair Hyperworks	Massa berkurang 24,63%, tegangan aman.
Sutanto et al.	2022	<i>Boom excavator Komatsu PC288US-3</i>	Metode elemen hingga	ANSYS	Massa turun >250 kg, tegangan di bawah <i>yield</i> .
Rahman, Suryo and Yunianto	2022	<i>Bucket CAT 390F L</i>	Metode elemen hingga	ANSYS	Massa berkurang, <i>safety factor</i> meningkat.
Huda, Mursyid and Akhmad	2022	<i>Fall block crane 30 ton</i>	Metode elemen hingga	Solidworks Simulation	Massa turun 15,21%, <i>safety factor</i> naik.

Penelitian yang dilakukan oleh (R. B. Sarode, 2017) menerapkan metode elemen hingga dan optimasi topologi pada *bucket link excavator*. Analisis dilakukan menggunakan CATIA V5, *Hypermesh*, dan ANSYS untuk menurunkan massa tanpa mengurangi kekuatan komponen. Hasil optimasi menunjukkan penurunan massa dari 113,29 kg menjadi 105,95 kg dengan tegangan maksimum 85,30 MPa, masih

di bawah batas desain. Validasi eksperimental dengan *Universal Testing Machine* menghasilkan nilai deformasi dan tegangan yang hampir identik dengan simulasi sehingga desain dinyatakan aman.

(Sarode and Sarawade, 2016) mengembangkan penelitian mengenai optimasi struktur *bucket link excavator* dengan menerapkan metode elemen hingga untuk mengevaluasi kekuatan komponen akibat beban kerja maksimum. Penelitian ini menggunakan material IS 2062 yang memiliki tegangan luluh sebesar 1030 MPa. Hasil analisis menunjukkan bahwa desain awal mengalami ⁴tegangan maksimum sebesar 763,41 MPa dengan deformasi sebesar 7,34 mm. Meskipun tegangan yang terjadi cukup tinggi, nilainya masih berada di bawah batas luluh material sehingga struktur dinyatakan aman. Berdasarkan distribusi tegangan yang diperoleh, peneliti mengusulkan optimasi dengan mengurangi material pada area yang mengalami tegangan rendah untuk menghasilkan desain yang lebih ringan dan ekonomis tanpa mengurangi kemampuan struktur dalam menahan beban operasional excavator.

(Zhang *et al.*, 2026) melakukan penelitian optimasi topologi *working device* excavator menggunakan metode *equivalent static loads* berbasis elemen hingga. Penelitian ini difokuskan pada komponen *arm* sebagai struktur utama yang mempengaruhi massa dan kekuatan. Metode yang digunakan menggabungkan analisis dinamik *rigid-flexible coupling* dengan simulasi pada Altair HyperWorks. Tujuan optimasi adalah mengurangi massa struktur tanpa melampaui batas tegangan yang diizinkan. Hasil awal menunjukkan ¹⁷tegangan maksimum sebesar 254,17 MPa masih di bawah batas material Q355B. Hal ini menunjukkan adanya potensi untuk dilakukan optimasi lebih lanjut. Hasil optimasi menunjukkan desain terbaik pada *volume fraction* 0,3–0,4. Massa struktur berhasil dikurangi sebesar 24,63% dari 1250 kg menjadi 942,04 kg. Tegangan maksimum meningkat menjadi 267,53 MPa namun tetap dalam batas aman. Dengan demikian, metode ini efektif menghasilkan struktur yang lebih ringan tanpa mengorbankan kekuatan.

(Sutanto *et al.*, 2022) melakukan ¹⁰optimasi desain *boom excavator* Komatsu PC288US-3 menggunakan metode elemen hingga dan pendekatan topologi. Penelitian ini menggunakan material Hardox 400 dengan analisis berbasis linear

static untuk memperoleh desain yang ringan dan efisien. Berdasarkan hasil penelitian, tegangan maksimum *Von Mises* yang diperoleh pada variasi pertama adalah 984,20 MPa dan 983,40 MPa pada variasi kedua, masih di bawah kekuatan luluh material sebesar 1000 MPa, sehingga ¹⁰ dinyatakan aman. Hasil optimasi topologi juga menunjukkan penurunan massa sebesar 298,70 kg pada desain pertama dan 256,17 kg pada desain kedua, yang berimplikasi pada pengurangan biaya

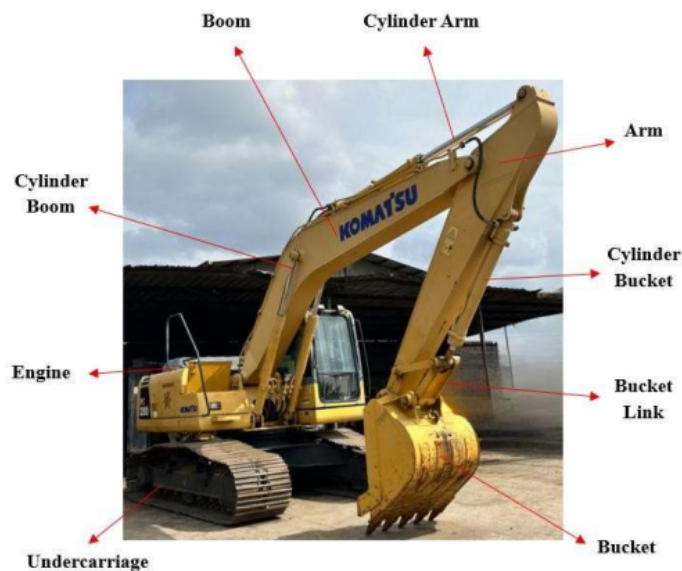
(Rahman, Suryo and ³Yunianto, 2022) melakukan penelitian berjudul Optimasi Desain dan Analisis Tegangan *Bucket Excavator CAT 390F L* Menggunakan Metode Topologi dan Elemen Hingga untuk menganalisis distribusi tegangan dan efisiensi massa pada desain *bucket excavator*. Dalam penelitian ini digunakan tiga ³ jenis material yaitu ASTM A36, AISI 1045, dan HARDOX-400. Hasil analisis menunjukkan bahwa ⁵ nilai tegangan *Von Mises* pada masing-masing material ³ adalah 296,10 MPa, 291,70 MPa, dan 291,50 MPa, dengan faktor keamanan tertinggi pada material HARDOX-400 sebesar 3,43. Setelah dilakukan optimasi topologi, diperoleh penurunan massa dari 4754,32 kg ³ menjadi 4492,48 kg pada variasi pertama dan 4532,46 kg pada variasi kedua. Tegangan maksimum setelah optimasi tercatat sebesar 296,20 MPa dan 293,2 ¹⁷ MPa, yang masih berada di bawah batas luluh material, sehingga desain hasil optimasi dinyatakan aman dan efisien.

(Huda, Mursid and Akhmad, 2022) ⁸meneliti Studi Optimasi Topologi pada *Fall Block Deck Crane* Kapasitas 30 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga untuk mengurangi berat struktur tanpa mengurangi kekakuan dan kekuatan mekanisnya. Menggunakan metode elemen hingga berbasis *SolidWorks Simulation*, penelitian ini berhasil menurunkan massa struktur sebesar 15,21%, dari 399,30 kg ⁸ menjadi 338,54 kg. Selain itu, tegangan *Von Mises* maksimum turun sebesar 1,24% menjadi 26,22 MPa, sedangkan ⁸ nilai *safety factor* meningkat 1,25% menjadi 9,53. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan optimasi topologi efektif dalam mengurangi massa sekaligus meningkatkan efisiensi desain struktur *crane* tanpa mengorbankan kekuatannya.

2

2.2 Hydraulic Excavator

Hydraulic excavator merupakan alat berat yang berperan penting dalam pekerjaan konstruksi karena kemampuannya melakukan penggalian, pemindahan material, hingga perataan permukaan tanah dengan tingkat presisi yang tinggi. Sistem kerjanya bergantung pada mekanisme hidrolik, yaitu fluida bertekanan yang dialirkan melalui pompa, katup, dan aktuator untuk menghasilkan gaya angkat serta dorong pada *boom*, *arm*, dan *bucket* (Zhang *et al.*, 2026). Teknologi ini memungkinkan *excavator* beroperasi pada berbagai kondisi tanah, termasuk tanah keras dan beban galian besar, tanpa kehilangan stabilitas ataupun akurasi saat pemuatan material ke *dump truck*.S



Gambar 2. 1. Hydraulic excavator

33

Konstruksi *excavator* tersusun atas dua bagian utama, yaitu *upper structure* dan *lower structure*. *Upper structure* berisi mesin, kabin operator, sistem kontrol hidrolik, serta *counterweight* yang dipasang di atas *swing bearing* sehingga dapat berputar hingga 360° untuk memperluas jangkauan kerja tanpa memindahkan posisi alat. Bagian *lower structure* terdiri dari *track frame* dan rangkaian *undercarriage* yang memberikan daya jelajah dan stabilitas selama bergerak di medan yang tidak rata. Selain itu, performa kerja *excavator* ditentukan oleh beberapa komponen operasional, yaitu:

1. *Bucket*, untuk menampung dan mengeruk material
2. *Arm*, sebagai penghubung bucket dengan jangkauan lebih jauh
3. *Boom*, yang menjadi penopang utama gerakan vertikal dan horizontal

Agar sesuai dengan kebutuhan lapangan, *hydraulic excavator* dikelompokkan berdasarkan berat operasi (*operating weight*). Pembagian ini membantu menentukan daya mesin, kapasitas bucket, jangkauan kerja, dan konsumsi energi alat. Berdasarkan (*Komatsu Performance Handbook*, 2019), klasifikasinya meliputi: *mini*, *medium*, *large*, dan *giant hydraulic excavator*.

2.3 Bucket link

Pada sistem kerja *excavator*, salah satu komponen penting yang menghubungkan gerakan antara *arm* dan *bucket* adalah *Bucket link*. Komponen ini berfungsi mentransfer gaya dari silinder hidrolik dan arm ke bucket, sehingga proses penggalian maupun pengangkatan material dapat berlangsung secara efisien, stabil, dan dapat dikendalikan dengan presisi.

Bucket link terdiri atas dua batang utama yang sejajar dan saling dihubungkan oleh komponen pengikat di bagian tengah. Pada setiap ujungnya terdapat dudukan pin yang berfungsi sebagai titik engsel untuk meneruskan gaya dan gerakan ke mekanisme *linkage* lainnya. Konfigurasi tersebut membuat distribusi gaya menuju *bucket* lebih seimbang di kedua sisi, mengurangi potensi puntir pada sambungan, serta menjaga keawetan *pin* dan *bushing* selama operasi penggalian (Slocum, 2008). Berikut merupakan tipe *Bucket link* Komatsu PC200.



Gambar 2. 2. *Bucket link*

2.4 Beban

Beban merupakan gaya dari luar yang bekerja pada suatu benda atau struktur. Menurut (Wicaksono, 2021) beban diklasifikasikan berdasarkan tipe pembebanan serta sistem kerjanya pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Tipe – Tipe Pembebanan

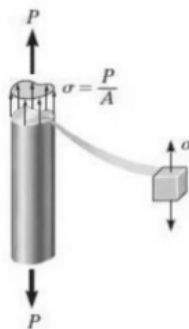
Jenis Pembebanan	Keterangan
Beban Steady	Tidak berubah ukuran dan arahnya
Beban Variabel	Berubah terus menerus
Beban Kejut	Seketika diberikan dan seketika dihilangkan
Beban Impact	Diterapkan dengan beberapa kecepatan awal
Menurut Sistem Kerjanya	Keterangan
Beban Statis	Besarnya konstan dan tanpa terpengaruh oleh waktu
Beban Dinamis	Beban tidak teratur dan bergantung pada waktu

2.5 Analisis Statik

Analisis statik berperan penting untuk menilai sejauh mana suatu komponen mampu menahan beban tanpa mengalami perubahan bentuk yang berlebihan (Wicaksono, 2021). Melalui pendekatan ini, diperoleh gambaran mengenai perilaku struktur ketika menerima gaya-gaya yang bersifat tetap. Hasil yang diamati biasanya mencakup nilai tegangan, regangan, serta simpangan yang terjadi pada komponen. Analisis ini membantu memastikan apakah material masih bekerja di bawah batas elastisnya atau sudah melewati batas luluh. Apabila nilai tegangan yang timbul lebih rendah dari kekuatan luluh material, maka komponen tersebut dapat dianggap aman karena tidak mengalami kerusakan akibat pembebanan statis (Lebedev, 2002).

2.5.1 Tegangan (*Stress*)

Ilmu kekuatan material menjelaskan bahwa tegangan merupakan gaya per satuan luas yang dinyatakan dalam N/mm^2 atau megapascal (MPa). Gambar 2.3 menunjukkan bagian potongan pada sebuah batang yang menimbulkan tegangan (*stress*) yang tidak seragam terhadap arah saat ditarik dengan gaya sebesar P dan direpresentasikan oleh sigma (σ).



18
Gambar 2. 3. Konsep Tegangan

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

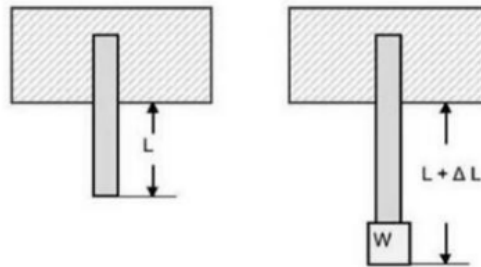
σ = tegangan (N/m^2)

F = gaya (N)

$A = \text{luas permukaan yang dikenakan gaya (m}^2\text{)}$

2.5.2 Regangan (Strain)

Pengujian tarik pada material menghasilkan perubahan panjang (deformasi) akibat gaya tarik yang diberikan. Gambar 2.4 menyajikan ilustrasi bahwa ketika spesimen diberikan gaya sebesar W , regangan dihitung sebagai rasio antara perubahan panjang atau deformasi terhadap panjang awal spesimen uji tarik.



Gambar 2. 4. Konsep Regangan

$$\Delta L = (L + \Delta L) - L \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

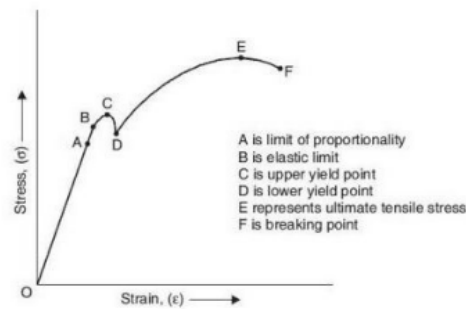
ΔL = perubahan panjang material akibat beban (m)

L_0 = panjang awal material (m)

ε = regangan

2.5.3 Kekuatan Luluh

Kekuatan luluh merupakan kemampuan suatu material untuk menahan beban hingga batas di mana material tersebut masih berada pada daerah elastis sebelum mengalami deformasi permanen.



Gambar 2. 5. Grafik Tegangan-Regangan

Dapat diperhatikan dari titik O hingga titik A, tegangan dan regangan yang terjadi memiliki linearitas. Titik A merupakan batas proporsional atau batas elastisitas seperti yang divisualisasikan oleh gambar 2.5. Berdasarkan definisi Hukum Hooke, terdapat ⁴¹ hubungan antara tegangan dan regangan yang berlaku dalam batas elastisitas material.

$$\sigma = E\varepsilon \dots\dots\dots (2.4)$$

σ = tegangan (N/m^2)

E = modulus Elastisitas (N/m)

ε = regangan

Menurut persamaan 2.4, hubungan antara besarnya tegangan dan regangan adalah linier.

2.5.4 Faktor Keamanan

Faktor keamanan berperan sebagai dasar pertimbangan untuk menjamin keselamatan selama proses perancangan. Kekuatan luluh material dan tegangan yang timbul akibat pembebanan dijadikan acuan utama dalam menentukan besarnya faktor keamanan, dapat dinyatakan melalui formula berikut:

$$F.S = \frac{\sigma_y}{\sigma_e} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

$F.S$ = faktor keamanan

σ_y = yield strength (MPa)

σ_e = tegangan maksimum *von mises* (MPa)

Untuk memastikan sebuah desain bekerja secara aman, nilai faktor keamanannya harus ditetapkan lebih tinggi. Struktur dianggap berisiko atau tidak memenuhi standar keselamatan bila faktor keamanannya berada pada rentang 0 hingga 1. Mengacu pada data tegangan luluh material dalam Tabel 2.3, ⁵ Joseph P. Vidosic memberikan rekomendasi nilai faktor keamanan yang sesuai dengan kondisi operasional dan karakter material yang digunakan.

Tabel 2. 3. Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan

No	Kondisi	Faktor Keamanan
1	⁶ Kondisi terkontrol dan tegangan yang bekerja dapat ditentukan dengan pasti	¹ 1,25 – 1,50
2	⁶ Material yang sudah diketahui, kondisi lingkungan beban dan tegangan yang tetap dan dapat ditentukan dengan mudah.	1,50 – 2,00
3	Material yang beroperasi secara rata-rata dengan batasan beban yang diketahui.	2,00 – 2,50
4	¹² Material yang diketahui tanpa mengalami tes. Pada kondisi beban dan tegangan rata-rata.	2,50 – 3,00
5	¹² Material yang sudah diketahui. Kondisi beban, tegangan dan lingkungan yang tidak pasti	3,00 – 4,50

2.6 Teori Kegagalan

Kajian mengenai kegagalan material menjadi salah satu aspek fundamental dalam analisis ketahanan struktur, karena membantu menentukan batas kemampuan suatu bahan ketika menerima pembebanan kompleks. Melalui pendekatan ini, dapat dipahami bagaimana interaksi antara tegangan tarik, tekan, dan geser memengaruhi perilaku material sebelum mengalami kerusakan permanen. Sejumlah teori telah dikembangkan untuk menjelaskan fenomena tersebut, antara lain ²⁴ *Maximum Normal Stress Theory*, *Maximum Shear Stress Theory*, *Mohr–Coulomb Theory*, dan *Maximum Distortion Energy Theory*. Masing-masing teori memiliki pendekatan

tersendiri sesuai dengan karakteristik material. Sebagai contoh, material getas seperti keramik lebih tepat dianalisis menggunakan *Maximum Normal Stress Theory*, sedangkan material ulet seperti baja lebih sesuai menggunakan *Maximum Distortion Energy Theory* yang memperhitungkan energi distorsi akibat deformasi plastis (Budynas, R.G. and Nisbett, 2011). kondisi kegagalan material dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\sigma_e > \frac{\sigma_y}{FS} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan:

σ_e = tegangan *von Mises* (MPa)

σ_y = tegangan yield (MPa)

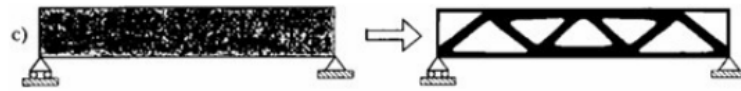
$F.S$ = faktor keamanan

Dari berbagai pendekatan yang telah dikemukakan, *Maximum Distortion Energy Theory* atau kriteria *von Mises* dianggap paling representatif dalam menggambarkan perilaku material ulet. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi ketika energi distorsi per satuan volume akibat kombinasi tegangan mencapai nilai kritis yang sama dengan energi distorsi saat material mulai mengalami luluh (*yielding*). Pendekatan ini telah terbukti memberikan hasil analisis yang lebih akurat terhadap batas kekuatan struktur di bawah kondisi pembebanan multiaxial dibandingkan teori kegagalan lainnya (Boresi, A. P., Schmidt, R. J., 2003).

2.7 Optimasi Topologi

Optimasi topologi merupakan metode desain berbasis komputasi yang secara otomatis menghasilkan tata letak material structural dalam ruang dan batasan desain tertentu dengan tujuan untuk memaksimalkan kinerja suatu sistem (Wu, Sigmund and Groen, 2021). Berbeda dengan optimasi ukuran atau bentuk yang beroperasi pada geometri tetap, optimasi topologi bekerja pada tahap awal desain dan memungkinkan perancangan ulang struktur secara radikal agar menghasilkan konfigurasi yang paling efisien secara mekanis dan ekonomis (Bendsoe and Sigmund, 2013). Dengan kata lain, proses ini merumuskan permasalahan desain

struktural sebagai upaya untuk mengoptimalkan distribusi material dalam suatu domain.



Gambar 2. 6. Optimasi Topologi

2.7.1¹ Optimasi Topologi *Solid Isotropic Material with Penalization*²

Metode SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) adalah salah satu pendekatan paling umum dalam optimasi topologi berbasis elemen hingga. Metode ini menggunakan konsep interpolasi kepadatan material untuk menentukan distribusi optimal material dalam suatu domain desain.

Secara umum persamaan interpolasi menggunakan faktor penalti p dengan persamaan matematika ditulis pada persamaan berikut:

$$f^p(\rho_i) = \rho_i^p \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana ρ_i adalah nilai relative element density, $0 < \rho_{min} \leq \rho_i \leq 1$. ρ_{min} adalah nilai terendah dari massa jenis dan nilai pinalti menentukan hasil optimasi. Semakin besar nilai faktor p akan menghasilkan efek pinalti yang semakin besar. Terlalu besar atau terlalu kecil nilai p akan berdampak buruk pada hasil optimasi.

Metode SIMP dapat memperoleh hasil dengan fleksibilitas minimum sebagai target optimasi dengan batasan volume dan massa dari material. Berikut ini adalah model matematikanya:

$$C(X_e) = \left\{ \sum_{i=1}^m w_i^p \left[\frac{c_i(x_e) - c_i^{min}}{c_i^{max} - c_i^{min}} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan Kondisi:

$$f = \frac{v - v_1}{v_0}$$

$$0 < x_{min} \leq x_e \leq 1$$

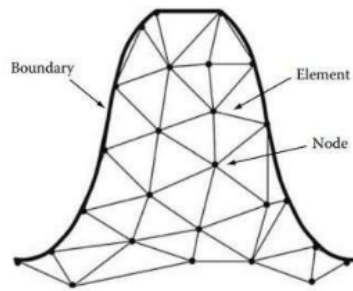
m adalah total jumlah kondisi kerja dari load pada proses optimasi topologi. w_i merupakan nilai weight pada kondisi kerja ke i . Sedangkan p merupakan factor penalty dari model interpolasi. $c_i(x_e)$ adalah compliance function pada kondisi kerja ke i dan merupakan fungsi objektif. C_{imax} dan C_{imin} adalah maximum compliance dan minimum compliance. f adalah volume akhir yang diperoleh setelah optimasi topologi. v merupakan volume awal dari desain struktur sebelum optimasi topologi. v_0 merupakan desain volume selama proses optimasi topologi dan v_1 merupakan volume minimum (Chen, Chen and Yang, 2021).

2

2.8 Finite Element Methode (FEM)

Finite Element Method (FEM) merupakan pendekatan komputasi yang digunakan untuk memecahkan persoalan rekayasa dengan cara memecah suatu sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil yang lebih sederhana. Metode ini telah menjadi standar dalam analisis struktur karena mampu memberikan hasil yang akurat serta fleksibel terhadap berbagai jenis geometri dan kondisi batas. Dalam praktiknya, FEM banyak diadopsi dalam perangkat lunak rekayasa yang digunakan pada bidang teknik sipil, mesin, penerbangan, dan disiplin teknik lainnya (Zienkiewicz, Taylor and Zhu, 2013). Finite Element Method termasuk ke dalam metode numerik yang digunakan untuk mendekati solusi dari *partial differential equations* yang muncul dalam berbagai fenomena fisis, seperti perpindahan panas, tegangan mekanik, dan dinamika fluida. Dengan kata lain, metode ini berperan penting dalam menyelesaikan *boundary value problems* pada ruang dua maupun tiga dimensi.

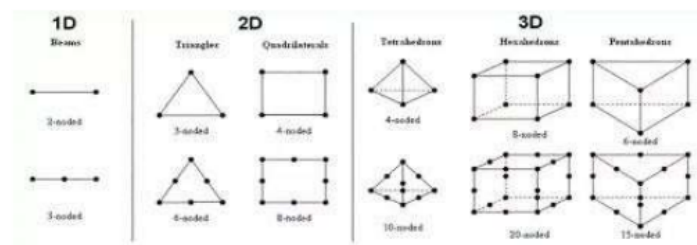
Pada penerapannya, objek yang akan dianalisis diuraikan menjadi sejumlah kecil elemen yang saling berhubungan melalui titik-titik tertentu yang disebut *nodes*. Hubungan antar elemen ini membentuk suatu sistem persamaan yang kemudian diselesaikan secara numerik dengan bantuan komputer. Tahapan pembagian domain menjadi elemen-elemen kecil ini dikenal dengan istilah *meshing* (Madier, 2020).



Gambar 2. 7. Mesh pada Metode Elemen Hingga

2.8.1 Tipe Elemen

Jenis elemen yang digunakan dalam suatu simulasi ditentukan oleh karakteristik analisis serta tipe masalah yang akan diselesaikan. Setiap elemen memiliki bentuk dan fungsi tersendiri, seperti elemen garis, area, maupun volume. Pada metode elemen hingga, ketiga jenis elemen tersebut menjadi dasar dalam proses pemodelan numerik. Elemen garis biasanya diaplikasikan untuk struktur sederhana seperti batang, pegas, atau balok. Elemen area berbentuk dua dimensi umumnya digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan pada pelat atau konduksi panas pada permukaan. Sementara itu, elemen volume digunakan ketika objek atau struktur yang diteliti memiliki bentuk tiga dimensi yang kompleks.



Gambar 2. 8. Tipe Elemen

2.8.2 Paduan Meshing

Pembuatan model berbasis metode elemen hingga menuntut akurasi tinggi, yang dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah elemen atau menggunakan elemen berorde tinggi. Kedua pendekatan tersebut meningkatkan ketelitian analisis, namun berdampak pada naiknya waktu dan beban komputasi. Metode elemen hingga sendiri terdiri atas ²¹ tiga tahap utama: *Pre-processing*, *Processing*, dan *Post-processing*. Tahap *Pre-processing* mencakup pembuatan geometri, penentuan sifat

material, serta pembentukan *mesh* yang merepresentasikan bentuk struktur. Selanjutnya, *Processing* menyelesaikan sistem persamaan berdasarkan beban dan batasan yang ditetapkan, sedangkan *Post-processing* menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik, kontur tegangan, atau deformasi (Arifin, 2022).

Dalam upaya mendapatkan solusi yang tepat untuk permasalahan struktural yang bersifat kompleks, pendekatan metode elemen hingga dipilih sebagai dasar analisis. Analisis dilakukan terhadap model *bucket link* yang dirancang menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD), kemudian dioptimasi secara topologis melalui perangkat lunak yang berbasis metode elemen hingga. Fokus penelitian ini diarahkan pada penentuan tegangan *von Mises*, dan *safety factor* sebagai dasar dalam penyempurnaan desain *bucket link* pada *hydraulic excavator*.

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kualitas *mesh* adalah *Skewness*. Nilai *Skewness* yang semakin kecil menunjukkan bentuk elemen yang semakin ideal (*excellent*), sementara nilai yang semakin mendekati satu mengindikasikan kualitas *mesh* yang buruk (*unacceptable*).

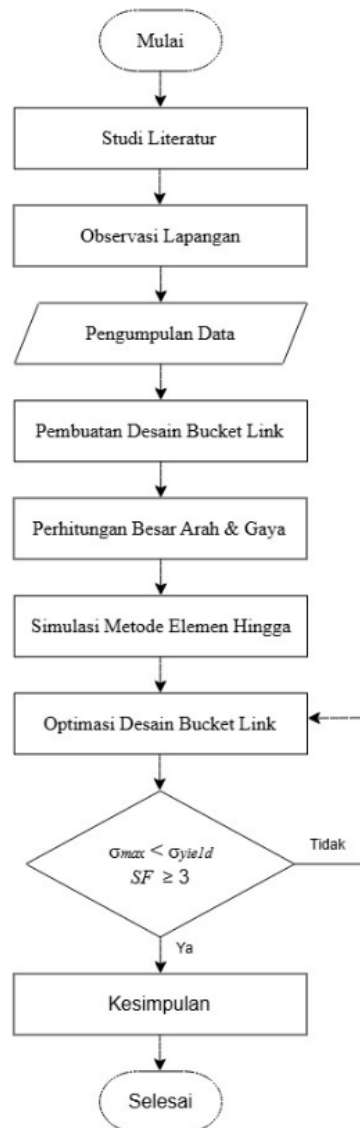


Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Gambar 2. 9. Parameter Skewness

METODE PENELITIAN**3.1 Diagram Alir**

Metode penelitian yang digunakan terdiri dari beberapa tahapan yang dilaksanakan secara sistematis. Sebagaimana yang telah digambarkan pada diagram alir di bawah ini:



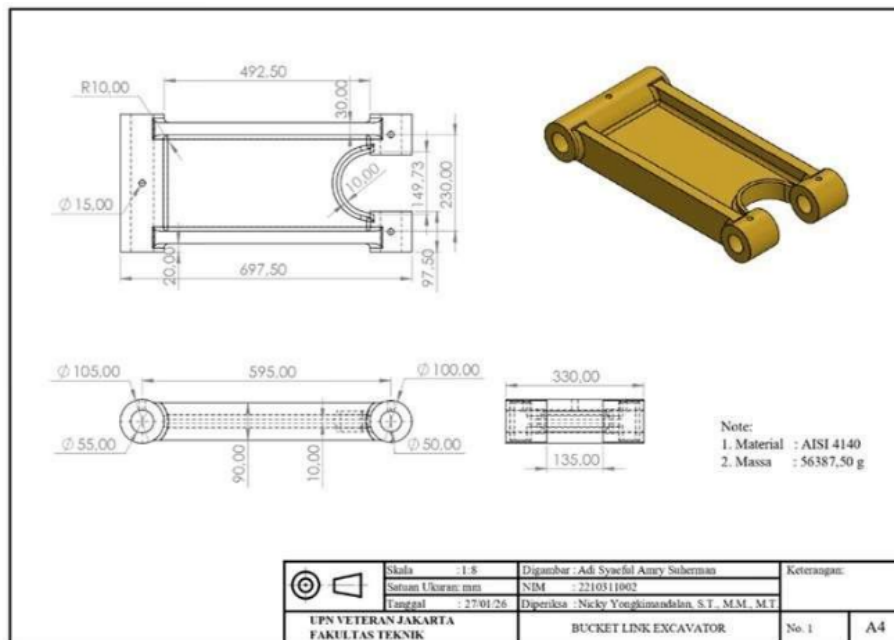
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi Literatur

Penelitian ini memanfaatkan studi literatur sebagai dasar pemahaman sekaligus sumber pengetahuan untuk merumuskan solusi terkait optimasi desain *bucket link*. Kajian literatur tersebut mencakup berbagai referensi seperti jurnal, buku, dan skripsi yang membahas optimasi desain, metode topologi, maupun pembahasan lain yang memiliki keterkaitan langsung dengan topik penelitian, sehingga analisis yang dilakukan memiliki landasan yang jelas dan relevan dengan permasalahan yang dikaji.

3.3 Desain *Bucket link* Excavator

Model *bucket link* dibuat menggunakan perangkat lunak *Solidworks* berdasarkan dimensi aktual di lapangan dengan mengacu pada metode pengukuran menurut (Khurmi and Gupta, 2005; Beckwith, 2011) sebagai representasi desain eksisting, seperti ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. Gambar Kerja *Bucket link* Excavator

3.4 Analisis Statik *Bucket link*

Berdasarkan data pada Tabel 3.1, yang merupakan katalog *hydraulic excavator* mengacu pada standar internasional SAE J1179 “*Surface Vehicle Standards – Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Forces*”. Gaya *digging* yang dilakukan oleh *bucket* yang dipilih dalam tugas akhir ini ialah 157 kN atau 157.000 N. Data

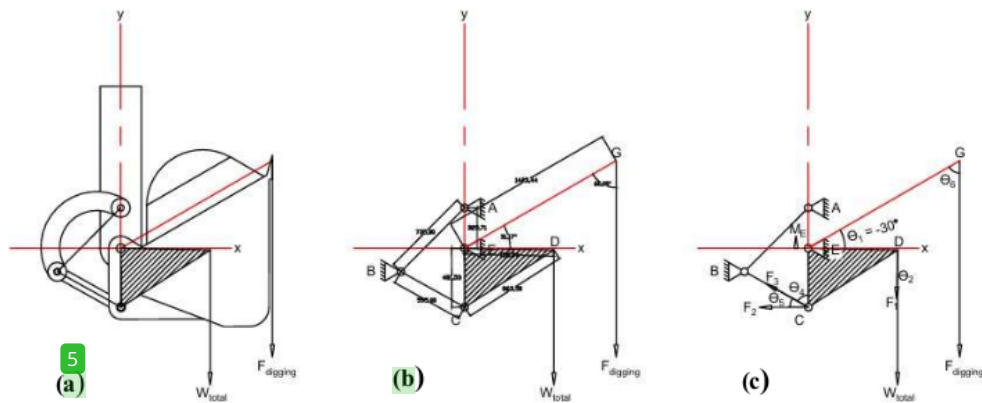
gaya yang dimasukkan ke dalam proses simulasi bersumber dari hasil analisa statik (R. B. Sarode, 2017).

Tabel 3. 1. ⁴ *Surface Vehicle Standards – Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Forces*

Sumber : (*Komatsu Performance Handbook*, 2019)

	Arm	1840 mm	2410 mm	2925 mm*
A	Max. digging height	9500 mm	9800 mm	10000 mm
B	Max. dumping height	6630 mm	6890 mm	7110 mm
C	Max. digging depth	5380 mm	6095 mm	6620 mm
D	Max. vertical wall digging depth	4630 mm	5430 mm	5980 mm
E	Max. digging depth of cut for 8° level	5130 mm	5780 mm	6370 mm
F	Max. digging reach	8850 mm	9380 mm	9875 mm
G	Max. digging reach at ground level	8660 mm	9190 mm	9700 mm
H	Min. swing radius	3010 mm	3090 mm	3040 mm
SAE rating	Bucket digging force at normal.	157 kN 16000 kg	138 kN 14100 kg	138 kN 14100 kg
	Arm crowd force at power max.	139 kN 14200 kg	124 kN 12600 kg	101 kN 10300 kg
ISO rating	Bucket digging force at normal.	177 kN 18000 kg	149 kN 15200 kg	149 kN 15200 kg
	Arm crowd force at power max.	145 kN 14800 kg	127 kN 13000 kg	108 kN 11000 kg

3.4.1 Analisis Statik pada kondisi *compression* dan *tension*



Analisis statik pada kondisi *compression* dan *tension* dilakukan menggunakan pendekatan *Free Body Diagram* untuk mengetahui distribusi gaya yang bekerja pada mekanisme *bucket link excavator* (Hibbeler, 2016). Pada gambar (a) menunjukkan kondisi aktual bucket excavator saat menerima pembebanan, gambar (b) menampilkan penyederhanaan mekanisme *linkage* dengan dimensi serta sudut kerja sistem, sedangkan gambar (c) memperlihatkan arah gaya-gaya yang bekerja pada *linkage*, yaitu gaya F_1 , F_2 , dan F_3 , beserta arah resultan gaya dan momen yang diteruskan menuju *bucket link*.

Pada kondisi *compression* yang terlihat pada gambar 3.3, konfigurasi sudut *linkage* dan arah pembebanan menyebabkan resultan gaya mengarah menuju titik sambungan *bucket link*, sehingga struktur mengalami pembebanan tekan. Gaya pengerukan ($F_{digging}$) serta berat total bucket (W_{total}) diteruskan melalui titik sambungan A, B, C, D, E, hingga G sesuai jalur distribusi gaya pada mekanisme. Berdasarkan hasil perhitungan analitik pada kondisi kritis, diperoleh gaya maksimum pada *bucket link* sebesar 444,32 kN. Kondisi ini menggambarkan keadaan saat *bucket excavator* melakukan proses pengerukan dan menerima tahanan material yang cukup besar.

Sedangkan pada kondisi *tension* yang ditunjukkan pada gambar 3.4, perubahan posisi bucket dan sudut kerja *linkage* menyebabkan arah resultan gaya berubah menjauhi titik sambungan. Kondisi tersebut mengakibatkan *bucket link* mengalami pembebanan tarik. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya minimum yang bekerja pada *bucket link* sebesar -24.22 kN.

Tabel 3. 2. Data *Nomenclature* pada Perhitungan Statik *Bucket link Excavator*

Variable	Value	Units	Value	SI Units
ρ_{load}	0,002	g/mm ³	2000	kg/m ³
V_{load}	1356622093,51	mm ³	1,35	m ³
m_{bucket}	1200000	g	1200	kg
$F_{digging}$	157	kN	157000	N
g	9810	mm/s ²	9,81	m/s ²
L_{AB}	735	mm	0,73	m

L_{BC}	595	mm	0,59	m
L_{CE}	481,53	mm	0,48	m
L_{CD}	863,5	mm	0,86	m
L'_{CD}	798,84	mm	0,79	m
L_{DE}	809,54	mm	0,80	m
L'_{DE}	769,91	mm	0,76	m
L_{AE}	329,71	mm	0,32	m
θ_{DEG}	31,17	deg.	0,54	rad
θ'_{DEG}	44,40	deg.	0,77	rad

Boundary movement pada penelitian ini merepresentasikan batas gerakan sudut mekanisme *bucket link* yang dinyatakan pada persamaan (1). Rentang sudut tersebut digunakan untuk menganalisis perubahan posisi *linkage* serta distribusi gaya selama proses kerja *bucket*. Ketika sudut $\theta_1 \geq 90^\circ$, material (*load*) diasumsikan sudah terbuang sehingga massa tanah tidak lagi dimasukkan dalam perhitungan pembebanan. Kondisi tersebut mengakibatkan posisi *Center of Gravity* (CoG) atau pusat massa sistem berubah terhadap koordinat kartesius karena distribusi massa pada *bucket* mengalami perubahan (Wilson, C. E., & Sadler, 2014).

$$-30^\circ \leq \theta_1 \leq 118^\circ \quad (1)$$

Metode Inverse Kinematics 2-Link Planar (Rider, 2015) digunakan untuk menentukan hubungan sudut antar-linkage pada mekanisme *bucket excavator* berdasarkan perubahan posisi *bucket*. Pada persamaan (2), sudut θ_2 ditentukan berdasarkan kondisi θ_1 , yaitu $\theta_2 = \theta_1 + \theta_{DEG}$ untuk $\theta_1 < 90^\circ$ dan $\theta_2 = \theta_1 + \theta'_{DEG}$ untuk $\theta_1 \geq 90^\circ$. Perbedaan persamaan ini digunakan untuk menyesuaikan perubahan konfigurasi geometri *linkage* selama pergerakan *bucket*. Selanjutnya, persamaan (3) – (10) digunakan untuk menghitung sudut dan panjang *linkage* secara berurutan menggunakan hukum cosinus hingga diperoleh sudut akhir θ_5 . Hasil perhitungan ini digunakan untuk menganalisis karakteristik gerak dan hubungan kinematik pada mekanisme *bucket excavator*.

$$\theta_2 = \begin{cases} \theta_1 + \theta_{DEG}, & \theta_1 < 90^\circ \\ \theta_1 + \theta'_{DEG}, & \theta_1 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta_{CED} = \begin{cases} \arccos\left(\frac{(L_{CE})^2 + (L_{DE})^2 - (L_{CD})^2}{2 \cdot L_{CE} \cdot L_{DE}}\right), & \theta_1 < 90^\circ \\ \arccos\left(\frac{(L_{CE})^2 + (L'_{DE})^2 - (L_{CD})^2}{2 \cdot L_{CE} \cdot L'_{DE}}\right), & \theta_1 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \theta_{CED} - 180^\circ \quad (4)$$

$$\theta_{AEC} = 90^\circ - \theta_3 \quad (5)$$

$$L_{AC} = \sqrt{(L_{CE})^2 + (L_{AE})^2 - 2 \cdot L_{CE} \cdot L_{AE} \cdot \cos(\theta_{AEC})} \quad (6)$$

$$\theta_{ACE} = \arccos\left(\frac{(L_{AC})^2 + (L_{CE})^2 - (L_{AE})^2}{2 \cdot L_{AC} \cdot L_{CE}}\right) \quad (7)$$

$$\theta_{ACB} = \arccos\left(\frac{(L_{AC})^2 + (L_{BC})^2 - (L_{AB})^2}{2 \cdot L_{AC} \cdot L_{BC}}\right) \quad (8)$$

$$\theta_4 = \theta_{ACE} + \theta_{ACB} \quad (9)$$

$$\theta_5 = |90^\circ - \theta_4| \quad (10)$$

15

Hukum Archimedes menyatakan bahwa suatu benda yang berada di dalam fluida akan mengalami gaya apung sebesar berat fluida yang dipindahkan. Prinsip ini digunakan untuk menentukan hubungan antara massa, massa jenis, dan volume suatu material. Pada persamaan (11), hubungan tersebut digunakan untuk menghitung massa material yang dimuat di dalam bucket berdasarkan massa jenis dan volume material yang diangkut.

$$m_{load} = \frac{\rho_{load}}{V_{load}} \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan analisis gaya dan momen pada mekanisme bucket sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (12) – (20), pembebanan pada sistem berasal dari berat *bucket*, muatan material, dan gaya penggalian (Hibbeler, 2016). Berat total digunakan untuk menentukan gaya F_1 , yang kemudian menghasilkan momen pada titik E melalui lengan momen L_{DE} atau L'_{DE} sesuai posisi kerja bucket. Momen tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung gaya F_2 yang diteruskan melalui mekanisme *linkage bucket*.

$$W_{total} = (m_{bucket} + m_{load}) \cdot g \quad (12)$$

$$W_{bucket} = m_{bucket} \cdot g, \quad (13)$$

$$F_1 = \begin{cases} W_{total} \cdot \cos(\theta_2), & \theta_1 < 90^\circ \\ W_{bucket} \cdot \cos(\theta_2), & \theta_1 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

$$M_E = \begin{cases} F_1 \cdot L_{DE}, & \theta_1 < 90^\circ \\ F_1 \cdot L'_{DE}, & \theta_1 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$M_E(digging) = \begin{cases} (F_{digging} \cdot L_{EG} \cdot \cos(90^\circ - \theta_6)) + M_E, & \theta_1 < 90^\circ \\ F_{digging} \cdot L_{EG} \cdot \cos(90^\circ - \theta_6), & \theta_1 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (16)$$

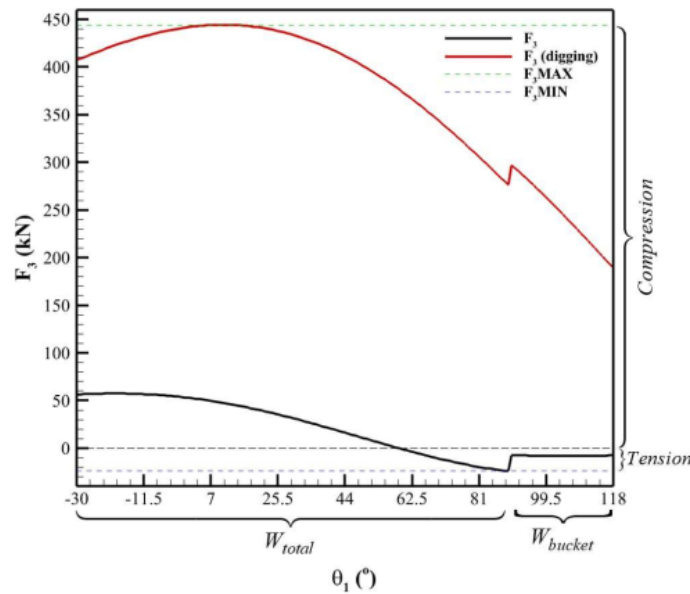
$$F_2 = \frac{M_E}{L_{CE}} \quad (17)$$

$$F_2(digging) = \frac{M_E(digging)}{L_{CE}} \quad (18)$$

$$F_3 = F_2 \cdot \cos(\theta_5) \quad (19)$$

$$F_3(digging) = F_2(digging) \cdot \cos(\theta_5) \quad (20)$$

Selain itu, gaya penggalian menghasilkan momen tambahan $M_E(digging)$ yang dipengaruhi oleh gaya penggalian, lengan momen L_{EG} , dan sudut θ_6 . Momen ini dikombinasikan dengan momen sebelumnya untuk memperoleh distribusi pembebanan yang lebih *representative* (Hibbeler, 2016). Selanjutnya, momen yang bekerja dikonversikan menjadi gaya pada *linkage* melalui lengan momen L_{CE} , sehingga diperoleh gaya $F_2(digging)$. Gaya-gaya yang dihasilkan kemudian diproyeksikan terhadap sudut θ_5 untuk memperoleh gaya F_3 dan $F_3(digging)$.



Gambar 3. 5. Grafik hubungan gaya F_3 dan F_3 (*digging*) terhadap sudut *bucket* (θ)

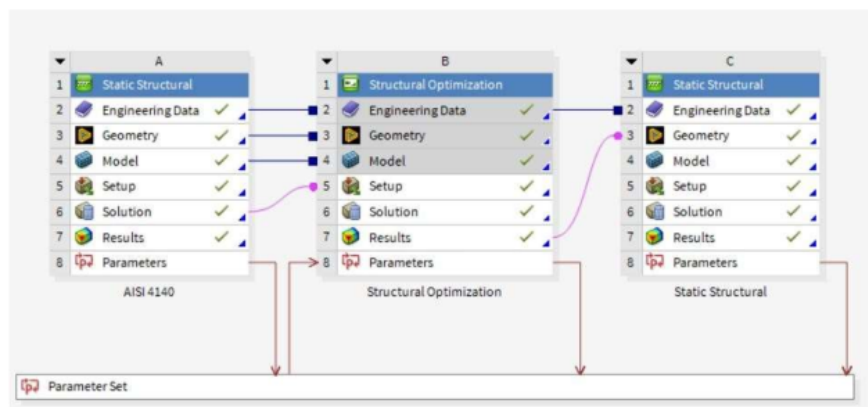
Gambar 3.5 menunjukkan hubungan gaya F_3 dan F_3 (*digging*) terhadap perubahan sudut *bucket* (θ_1). Nilai F_3 (*digging*) meningkat dari sekitar 410 kN pada sudut -30° hingga mencapai nilai maksimum sebesar 444,32 kN pada rentang sudut sekitar 7° – 15° , kemudian menurun secara bertahap seiring bertambahnya sudut *bucket*. Pada sudut mendekati 90° terjadi perubahan tren akibat perubahan kondisi pembebanan dari W_{total} menjadi W_{bucket} . Sementara itu, gaya F_3 mengalami penurunan dari kondisi tekan (*compression*) menuju kondisi tarik (*tension*) dan mencapai nilai minimum sebesar -24,22 kN. Perbedaan yang signifikan antara kedua kurva menunjukkan bahwa gaya penggalian memberikan kontribusi dominan terhadap pembebanan pada *bucket link*, sehingga nilai maksimum F_3 (*digging*) sebesar 444,32 kN digunakan sebagai kondisi pembebanan kritis dalam analisis kekuatan struktur seperti ditunjukkan pada [table 3.3](#).

Tabel 3. 3. Nilai maksimum dan minimum gaya F_3

F3 Max (kN)	F3 Min (kN)
444,32	-24,21

3.5 Simulasi Metode Elemen Hingga

Pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Ansys Workbench R1*. *Software* tersebut dipilih karena dapat menyelesaikan masalah struktural suatu perancangan yang kompleks dengan penyelesaian yang baik dan cepat menggunakan metode elemen hingga. Dalam simulasi ini, model *bucket link* akan dianalisis menggunakan modul *static structural* dan selanjutnya akan dilakukan optimasi desain pada modul *structural optimization*. Setelah mendapatkan hasil dari optimasi desain, akan dilanjutkan dengan analisis kembali dengan *static structural*.



Gambar 3. 6. Tampilan User Interface Ansys Workbench R1- Static Structural

3.5.1 Pemilihan Material

Variasi material diterapkan sebagai metode optimasi dalam penelitian ini dengan menggunakan AISI 4140 dan AISI 4340. Karena data kedua material tidak tersedia secara lengkap pada database *Ansys Workbench*, maka properti mekanisnya dimasukkan secara manual berdasarkan literatur. AISI 4140 merupakan baja paduan rendah yang memiliki keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan ketangguhan, serta mudah diproses melalui pengelasan, pembentukan, dan permesinan dengan ketahanan korosi yang cukup baik. Sementara itu, AISI 4340 adalah baja paduan rendah dengan kandungan nikel, kromium, dan molibdenum yang memberikan kekuatan dan ketangguhan lebih tinggi, sehingga sesuai untuk aplikasi dengan beban berat dan kondisi kerja ekstrem. Spesifikasi sifat mekanis dari masing-masing material tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 4. Mechanical Properties AISI 4140

Sumber : (Sebayang, Max and Silitonga, 2021)

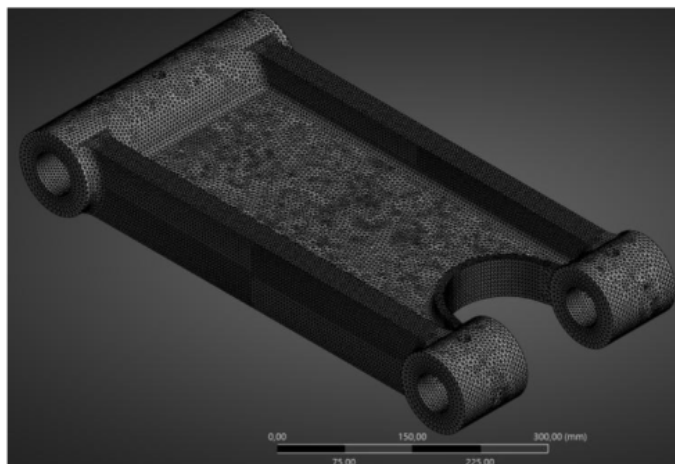
<i>Property</i>	<i>Value</i>
² <i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Yield Strength</i>	415 MPa
<i>Tensile Strength</i>	655 MPa
<i>Young's modulus</i>	205 GPa
<i>Poisson's ratio</i>	0,29

Tabel 3. 5. Mechanical Properties AISI 4340

Sumber : (Hussain *et al.*, 2020)

<i>Property</i>	<i>Value</i>
² <i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Yield Strength</i>	470 MPa
<i>Tensile Strength</i>	745 MPa
<i>Young's modulus</i>	205 GPa
<i>Poisson's ratio</i>	0,29

3.5.2 Meshing



Gambar 3. 7. Meshing

Diskritisasi (*meshing*) adalah tahap ketika suatu model dipecah menjadi elemen-elemen berjumlah terbatas untuk dianalisis. Pada penelitian ini dipilih metode tetrahedron karena bentuk *mesh* tersebut dinilai lebih mampu mengikuti kontur model yang rumit. Kualitas *mesh* dievaluasi menggunakan parameter *skewness*. Untuk memperoleh hasil simulasi yang semakin mendekati kondisi nyata, *mesh* yang dihasilkan harus memiliki kualitas yang memadai. oleh karena itu, *mesh convergent test* dilakukan terlebih dahulu sebelum simulasi utama dijalankan (Madier, 2020).

Untuk dapat menghitung jumlah elemen yang harus dibuat, sebagaimana yang ditampakkan pada tabel 3.6, pendekatan simulasi yang digunakan dalam tugas akhir ini menggunakan variasi *meshing*. Variasi ukuran *mesh* diterapkan dalam rentang 10 mm hingga 4 mm dengan selang 1 mm pada setiap intervalnya.

Tabel 3. 6. Mesh Convergent Test

<i>Element Size (mm)</i>	<i>Von misses (Mpa)</i>	<i>Skewness Average</i>	<i>Mesh Nodes</i>	<i>Mesh Element</i>	<i>Error (%)</i>
10	208,10	0,401	5723	31798	-
9	215,22	0,404	71398	40045	3,42
8	218,40	0,405	89379	50524	1,48
7	227,49	0,410	12386	70505	4,16
6	215,33	0,419	161568	91989	5,35
5	221,96	0,429	244299	140566	3,08
4	218,81	0,438	376055	217626	1,42

Berdasarkan hasil konvergensi *mesh* yang ditunjukkan pada Tabel 3.6, ukuran *mesh* yang digunakan adalah 4 mm dengan pertimbangan jumlah elemen, *skewness average*, dan nilai *error*. Jumlah node yang digunakan oleh ukuran elemen 4 mm selama proses *meshing* adalah 376.05, dengan *skewness average* sebesar 0,438 dan nilai *error* sebesar 1,42 % dari nilai *von Mises* sebelumnya. Berdasarkan parameter *skewness* yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, nilai

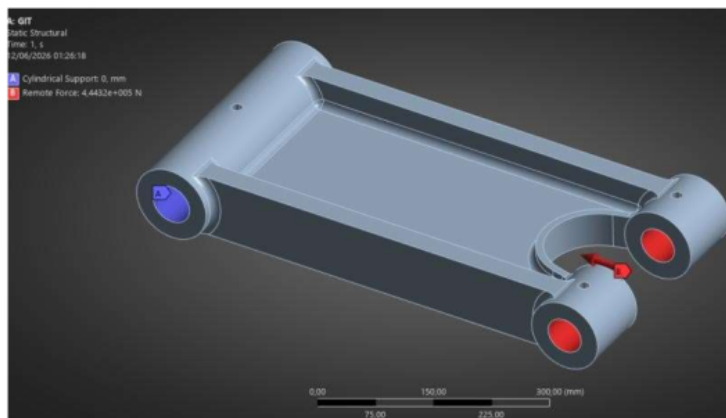
skewness average dari proses *meshing* dengan ukuran elemen 4 mm termasuk ke dalam kategori baik (*good*).

3.5.3 Boundary condition

Boundary condition merupakan syarat yang harus dipenuhi oleh model agar proses iterasi dapat berjalan dengan baik. Kondisi batas ini berfungsi untuk menetapkan ruang lingkup atau batas kerja model selama simulasi sehingga ⁴hasil yang diperoleh sesuai dengan tujuan analisis. Sistem koordinat kartesian digunakan untuk menggambarkan kondisi batas pada *bucket link hydraulic excavator*, dengan sumbu X mewakili arah horizontal, sumbu Y arah vertikal, dan sumbu Z arah lateral.

Dalam proses simulasi, kondisi batas diterapkan berupa *cylinder support* pada lubang pin, sebagaimana ditunjukkan oleh penanda berwarna biru. Penetapan ini menggambarkan kondisi aktual saat *bucket link* terhubung dengan mekanisme linkage dan menerima gaya reaksi selama proses penggalian maupun pengangkutan material (R. B. Sarode, 2017).

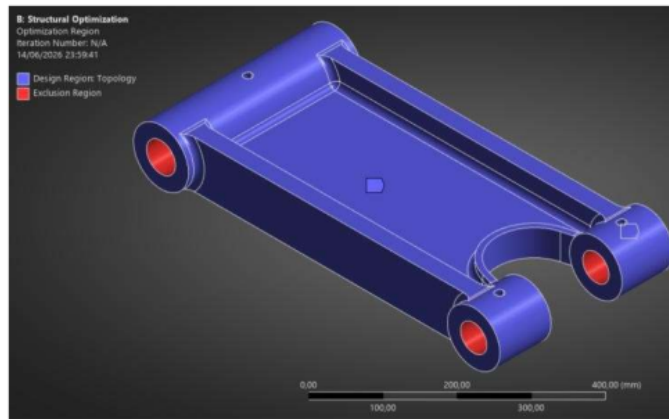
Pembebanan diberikan dalam bentuk *force* yang diarahkan pada area tertentu dari komponen, ditunjukkan oleh panah merah. Besaran gaya yang digunakan dalam penelitian telah dijelaskan pada subbab 3.4. Gambaran mengenai kondisi batas dan pembebanan tersebut ¹⁶ditampilkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Boundary condition

3.5.4 Proses Optimasi Desain *Bucket link*

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga melalui perangkat lunak ANSYS, dapat ditentukan bagian-bagian pada komponen *bucket link* yang berpotensi untuk dioptimasi serta area yang harus dipertahankan. Area yang ditandai dengan warna biru merepresentasikan bagian yang masih dapat dimodifikasi guna meningkatkan kinerja struktur, sedangkan area berwarna merah menunjukkan bagian kritis yang tidak diperkenankan mengalami perubahan karena berperan penting dalam menjaga kekuatan dan kestabilan. Berdasarkan identifikasi tersebut, pendekatan optimasi yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi optimasi topologi dan optimasi bentuk geometris.



1 Gambar 3. 9. Bagian *Bucket link* yang dapat di Optimasi

3.5.5 Parameter Hasil Simulasi

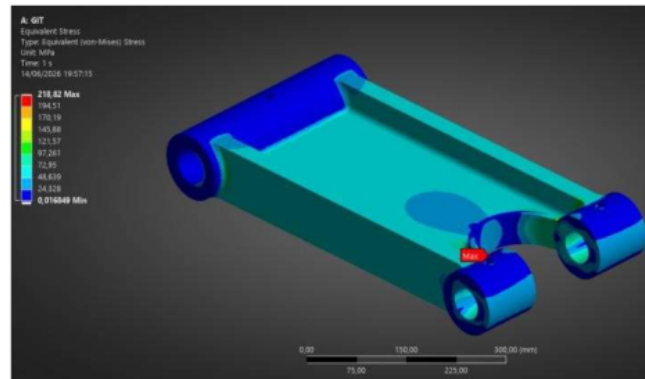
Pada tahap akhir simulasi optimasi desain *bucket link*, dilakukan evaluasi terhadap sejumlah parameter utama untuk menilai kinerja dan efektivitas hasil desain. Parameter yang dianalisis mencakup distribusi tegangan maksimum (*von Mises*), faktor keamanan (*safety factor*), serta berat akhir setelah proses optimasi. Tegangan maksimum dikaji untuk memastikan bahwa komponen mampu menahan beban operasional tanpa melampaui batas kekuatan luluh material. Sementara itu, faktor keamanan digunakan sebagai ukuran keandalan struktur melalui perbandingan antara tegangan kerja dan kekuatan material. Selain aspek kekuatan, optimasi juga difokuskan pada pengurangan massa *bucket link* tanpa mengurangi kemampuan strukturalnya. Melalui pendekatan ini, dihasilkan desain yang lebih ringan namun tetap aman dan mampu bekerja secara optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

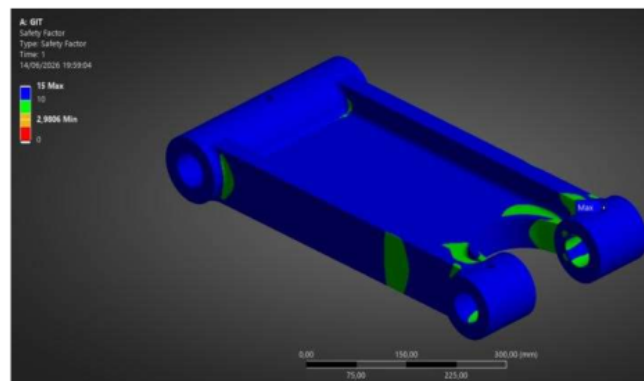
4.1.1 Hasil Simulasi Pembebanan

Analisis pembebanan awal dilakukan untuk mengetahui kapasitas kekuatan *bucket link* sebelum dilakukan optimasi topologi, sehingga hasilnya dapat digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi peningkatan yang terjadi setelah dilakukan optimasi. Pada tahap ini, beban diaplikasikan pada titik sambungan *bucket link* sesuai arah gaya yang bekerja pada mekanisme *bucket* selama operasi seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.4 dengan material AISI 4140.



19

Gambar 4. 1. Hasil Uji Pembebanan



Gambar 4. 2. Nilai Safety factor

Hasil analisis elemen hingga ² menunjukkan bahwa tegangan *Von Mises* maksimum yang terjadi pada *bucket link* masih berada jauh di bawah nilai *yield strength* yaitu 218,82 MPa. Perhitungan faktor keamanan pada kondisi pembebanan tersebut menghasilkan nilai sebesar 2,9806 seperti ditunjukkan pada gambar 4.2 , sehingga struktur dinyatakan aman dan tidak mengalami kegagalan material. Dengan demikian, desain masih memiliki ruang untuk dilakukan optimasi tanpa mengurangi tingkat keselamatan konstruksi.

4.1.2 Hasil Optimasi Topologi

Pada proses simulasi optimasi topologi, diperoleh 3 variasi desain berdasarkan parameter *percent to retain* dengan interval peningkatan 10% pada setiap iterasinya dan 2 variasi material. Setiap tingkat *percent to retain* menghasilkan model struktur yang berbeda tegangan dan massanya, yang kemudian seluruh hasilnya dirangkum dalam tabel 4.1 – 4.2. Dari keseluruhan variasi tersebut, diperoleh desain dengan massa paling ringan pada konfigurasi *percent to retain* 70% dengan material AISI 4340, sedangkan massa terbesar berada pada konfigurasi *percent to retain* 90% dengan material AISI 4140.

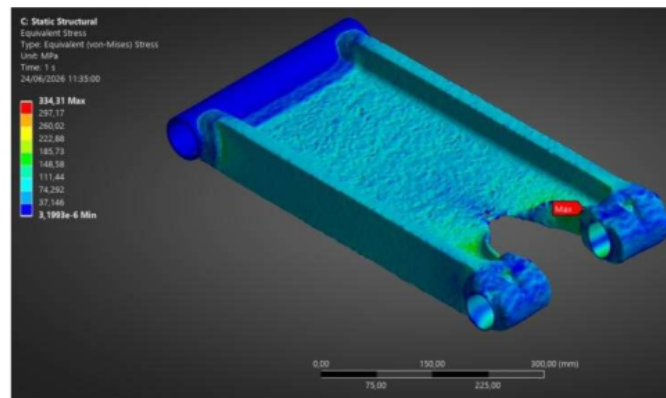
Tabel 4. 1. Hasil Optimasi Topologi AISI 4140

<i>Percent to retain</i>	Massa Akhir (Kg)	Tegangan Maksimal (MPa)	<i>Safety factor</i>
90%	47,27	191,81	3,02
80%	44,21	204,55	3,18
70%	36,40	229,52	2,84

Tabel 4. 2. Hasil Optimasi Topologi AISI 4340

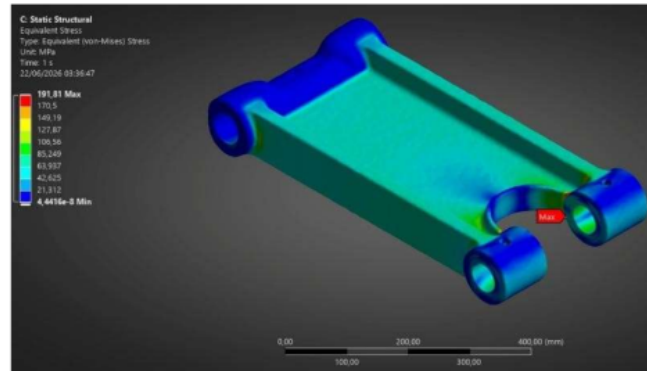
<i>Percent to retain</i>	Massa Akhir (Kg)	Tegangan Maksimal (MPa)	<i>Safety factor</i>
90%	37,42	219,60	3,89
80%	34,27	310,43	2,75
70%	31,92	334,31	2,55

Dengan konfigurasi *percent to retain* 70% simulasi optimasi topologi menghasilkan geometri seperti pada gambar 4.3. Geometri hasil optimasi menunjukkan penurunan massa yang cukup signifikan, namun peningkatan tegangan maksimum yang terjadi sudah melampaui batas factor keamanan yang ditetapkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun efisiensi material meningkat, pengurangan volume pada area kritis menyebabkan kekuatan *bucket link* menurun.



1 **Gambar 4. 3.** Hasil Optimasi Topologi *Percent to retain* 70%

Pada gambar 4.3 menunjukkan bentuk *bucket link* hasil optimasi topologi dengan *percent to retain* 70% yang memiliki volume lebih sedikit di beberapa area non-kritis dan mengakibatkan massa berkurang menjadi 36,40 Kg pada material AISI 4140 dan 31,92 Kg pada material AISI 4340. Pada simulasi static structural terhadap *bucket link* hasil optimasi topologi, nilai tegangan maksimum yang teridentifikasi adalah 229,52 MPa dan 334,31 MPa untuk material AISI 4140 dan AISI 4340 secara berurutan. Tegangan maksimum terjadi pada bagian area transisi di sekitar lubang pin bagian ujung *bucket link*, hal ini disebabkan oleh kombinasi pengaruh geometri yang mengalami pengurangan material dan pembebanan yang diterima pada sambungan pin. Faktor keamanan pada *bucket link* juga sudah berada dibawah batas minimal yang sudah ditetapkan peneliti, sehingga *bucket link* tersebut tidak dapat digunakan.



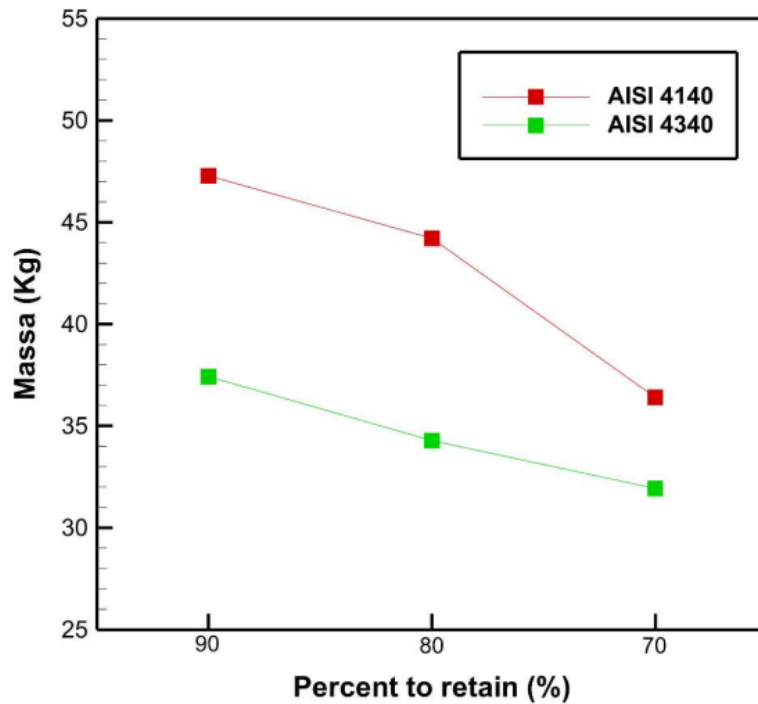
1 **Gambar 4. 4.** Hasil Optimasi Topologi *Percent to retain* 90%

Dengan konfigurasi *percent to retain* sebesar 90%, diperoleh bentuk struktur *bucket link* yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Optimasi ini menghasilkan pengurangan massa material sekitar 16,17%, dari awalnya 56,39 Kg menjadi 47,27 Kg untuk material AISI 4140 dan 37,42 Kg untuk material AISI 4340. Geometri yang dihasilkan tidak memiliki banyak bagian yang tereduksi, sehingga peningkatan tegangan maksimum yang terjadi relatif kecil, yaitu sebesar 12,39% dari 218,81 MPa menjadi 191,81 MPa untuk material AISI 4140 dan 219,60 MPa untuk material AISI 4340. Titik kritis tegangan tertinggi tetap berada pada area transisi lengkungan di antara kedua lug bagian depan *bucket link* sebagaimana kondisi pada saat sebelum di optimasi, namun tetap mengalami peningkatan akibat perubahan geometri di sekitar area tersebut. Konfigurasi ini dapat dianggap cukup baik dari sisi distribusi tegangan, namun efisiensi pengurangan massa yang dihasilkan masih belum sesuai dengan target optimasi.

Proses pengambilan data pada optimasi topologi dihentikan pada tahap *percent to retain* sebesar 70% karena faktor keamanan maksimum yang diperoleh telah melampaui nilai 3, yang menjadi batas minimal sesuai kriteria desain yang ditetapkan peneliti.

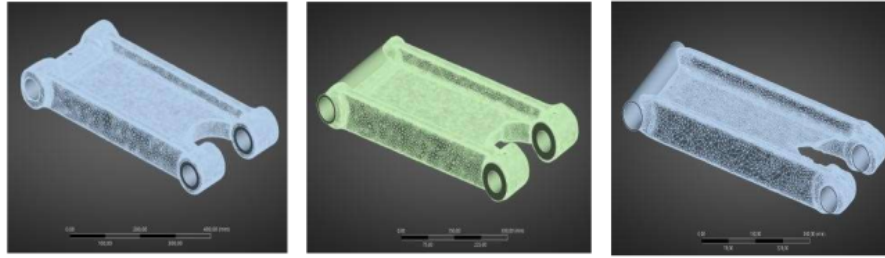
4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh *Percent to retain* Terhadap Massa



Gambar 4. 5. Grafik *Percent to retain* Vs Massa

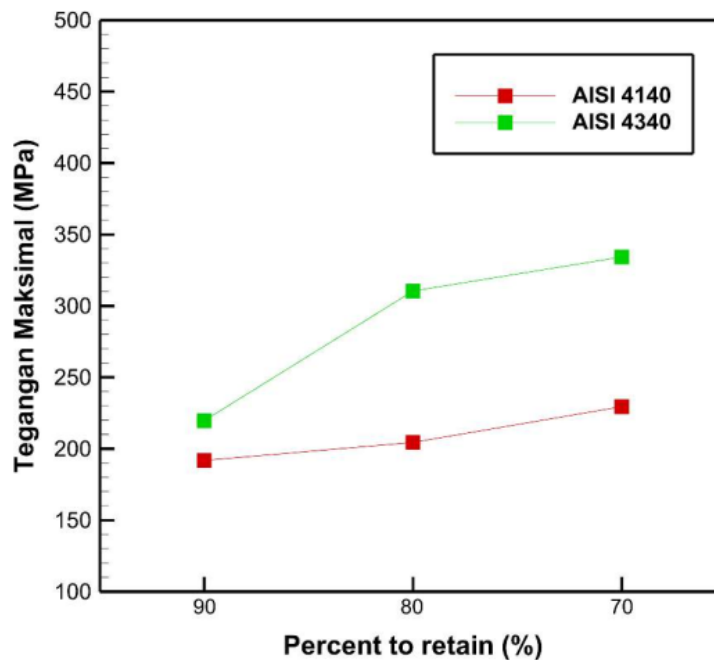
Pada grafik *Percent to retain* terhadap massa dalam gambar 4.5 menunjukkan pola penurunan massa seiring menurunnya nilai *Percent to retain* untuk kedua jenis material, yaitu AISI 4140 dan AISI 4340. Semakin kecil *Percent to retain*, semakin banyak bagian material yang dihilangkan pada proses optimasi topologi, sehingga massa struktur berkurang secara bertahap. Material AISI 4140 memiliki massa lebih tinggi dibandingkan AISI 4340 pada seluruh variasi karena densitasnya yang lebih besar. Pada *Percent to retain* tertinggi 90%, massa struktur masih relatif besar dan berkurang secara konsisten setiap penurunan *percent to retain* 10% hingga mencapai nilai terendah pada *Percent to retain* 70%.



Gambar 4. 6. Perbandingan Hasil Topologi 90%, 80%, dan 70%

Berdasarkan perbandingan pada gambar 4.6, perubahan geometri yang paling signifikan setelah proses optimasi topologi terjadi pada bagian badan *bucket link* yang berada di antara kedua sambungan pin. Pengurangan material difokuskan pada area tersebut karena kontribusinya yang besar terhadap total berat komponen serta lokasi beban yang relatif lebih rendah. Material pada daerah sambungan pin dipertahankan sehingga komponen tersebut tetap memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai dalam mentransmisikan beban. Dengan demikian, proses optimasi mampu menurunkan massa komponen tanpa mengorbankan integritas struktural pada elemen yang menerima beban kritis.

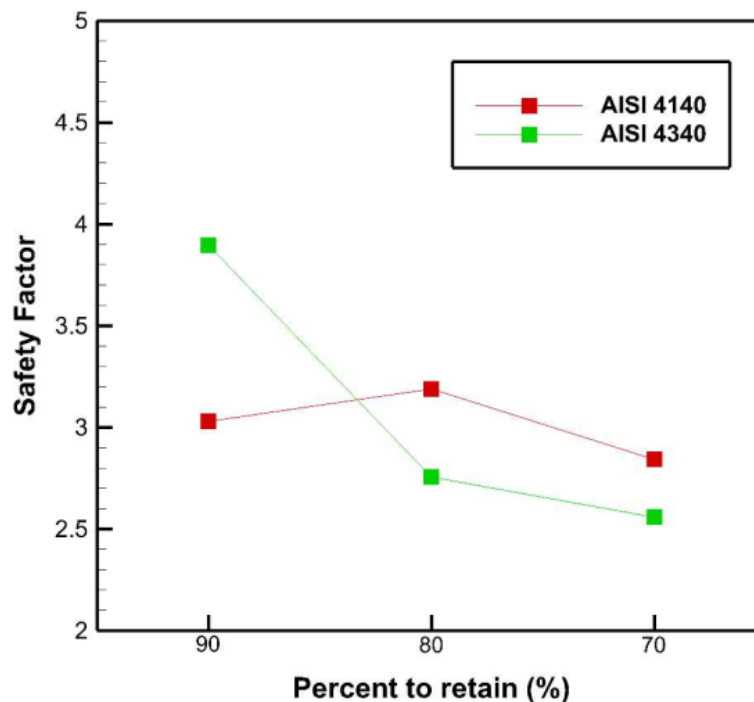
4.2.2 Pengaruh ¹ *Percent to retain* Terhadap Tegangan Maksimal



Gambar 4. 7. Grafik *Percent to retain* Vs Tegangan Maksimal

Pada grafik hubungan antara *Percent to retain* dan tegangan maksimal menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tegangan maksimal pada setiap penurunan *Percent to retain* untuk kedua jenis material, yaitu AISI 4140 dan AISI 4340. Hal ini terjadi karena semakin kecil *Percent to retain*, semakin banyak bagian struktur yang dieliminasi pada proses optimasi topologi, sehingga luas area penampang efektif berkurang dan menyebabkan konsentrasi tegangan meningkat pada titik-titik kritis. Material AISI 4340 menunjukkan tegangan maksimum yang sedikit lebih tinggi dibandingkan AISI 4140 pada setiap variasi, sejalan dengan perbedaan modulus elastisitas dan tingkat kekakuan kedua material tersebut. Peningkatan tegangan ini menjadi indikator bahwa meskipun optimasi topologi mampu mengurangi massa, terdapat batas pengurangan material yang harus diperhatikan agar struktur tetap memenuhi kriteria kekuatan dan faktor keamanan. Oleh karena itu, pemilihan *Percent to retain* yang optimal ³⁸ perlu mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi massa dan kemampuan struktur dalam menahan beban kerja.

4.2.3 Pemilihan Optimasi Topologi Terbaik



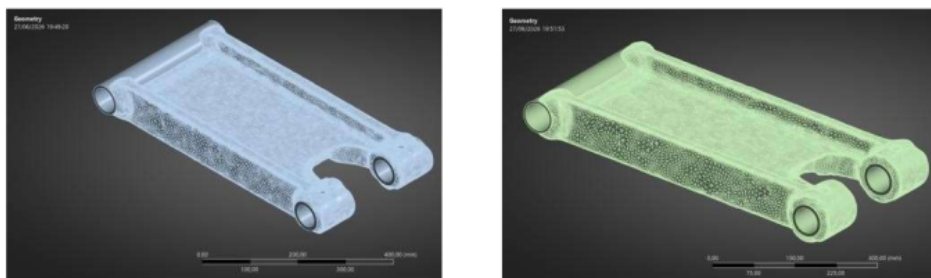
1 Gambar 4. 8. Grafik Percent to retain Vs Safety factor

Pemilihan konfigurasi optimasi topologi yang paling sesuai dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan antara persentase *percent to retain* terhadap nilai *safety factor*. Berdasarkan grafik pada gambar 4.8, diketahui bahwa semakin kecil *percent to retain*, massa semakin berkurang dengan diikuti penurunan nilai faktor keamanan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang dapat menentukan titik optimum dengan persyaratan faktor keamanan minimum tetap terpenuhi. Dalam penelitian ini, batas faktor keamanan yang ditetapkan adalah ≥ 3 sesuai dengan batas minimal yang sudah ditetapkan peneliti.

Untuk memperoleh nilai *percent to retain* yang menghasilkan faktor keamanan tepat sebesar 3, dilakukan perhitungan interpolasi linier pada dua titik data terdekat untuk masing – masing material. Pada material AISI 4140 digunakan *percent to retain* 80% dengan *Safety factor* sebesar 3,18 dan 70% dengan *Safety factor* sebesar 2,84. Sedangkan pada material AISI 4340 digunakan *percent to retain* 90% dengan *Safety factor* 3,89 dan 80% dengan *Safety factor* 2,75. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *Safety factor* = 3 pada material AISI 4140

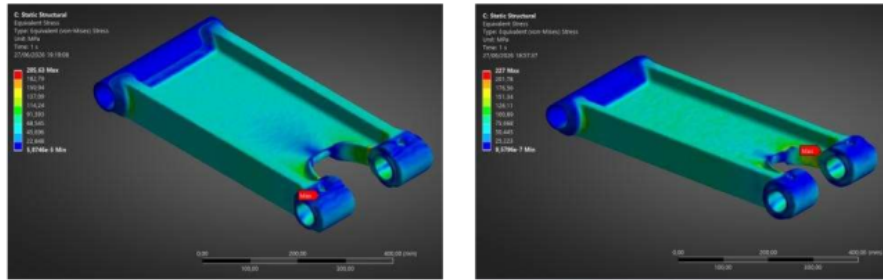
dicapai pada *percent to retain* sekitar 74,57%, sedangkan pada material AISI 4340 dicapai pada *percent to retain* 82,15%. Dengan demikian, konfigurasi desain hasil optimasi pada *percent to retain* sebesar 74,57% pada material AISI 4140 dan 82,15% pada material AISI 4340 menjadi pilihan yang paling ideal, karena mampu memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi massa dan kekuatan struktur yang masih memenuhi kriteria keamanan.

4.2.4 Analisis Optimasi Topologi Terbaik



Gambar 4. 9. Hasil Optimasi Topologi dengan Parameter Terbaik, (a) Material AISI 4140, (b) Material AISI 4340

Pada gambar 4.9 memperlihatkan hasil akhir geometri *bucket link* setelah melalui proses optimasi topologi dengan parameter terbaik untuk masing masing material. Pada material AISI 4140 yaitu sebelah kiri, konfigurasi optimal dicapai pada *Percent to retain* sebesar 74,57% dengan massa akhir sebesar 42,11 Kg setelah pemodelan ulang pada ANSYS SpaceClaim. Sementara itu, pada material AISI 4340 nilai optimum diperoleh pada *Percent to retain* sebesar 82,15% dengan massa akhir sebesar 35,91 Kg. Pengurangan material paling banyak terjadi pada bagian lengkungan yang memiliki distribusi tegangan lebih rendah, sehingga tidak memberikan dampak signifikan terhadap integritas struktural.



Gambar 4. 10. Hasil Tegangan *von misses* dengan Parameter *Percent to retain* Terbaik

Analisis tegangan berdasarkan gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai *von misses* maksimum pada *bucket link* hasil optimasi topologi masih berada dalam batas kelayakan material untuk kedua jenis material yang digunakan. Pada material AISI 4140, tegangan maksimum tercatat sebesar 205,63 MPa dan pada AISI 4340 sebesar 227 MPa, yang dimana lokasi tegangan terbesar masih berada di tempat yang sama yaitu pada transisi lengkungan di antara kedua lug bagian depan *bucket link*. Kemudian perbandingan tegangan maksimum dengan yield strength material menunjukkan bahwa *bucket link* AISI 4140 memiliki *safety factor* sebesar 3,17, sementara *bucket link* AISI 4340 memiliki nilai sebesar 3,76, sehingga keduanya masih dinilai aman terhadap beban yang bekerja.

Tabel 4. 3. Perbandingan Hasil Analisis Optimasi Topologi Terbaik

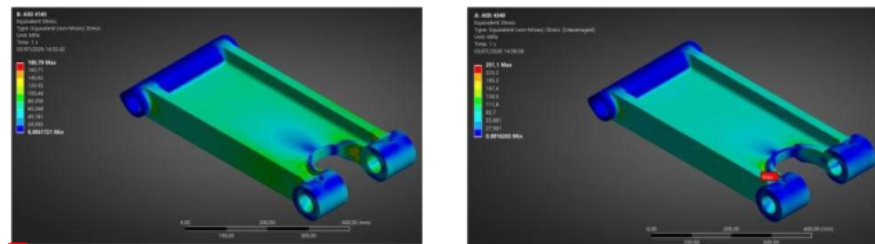
Pembanding	AISI 4140	AISI 4340
Massa (Kg)	42,11	35,91
Tegangan Maksimum (MPa)	205,63	227
<i>Safety Factor</i>	3,17	3,76

4.2.5 Desain Akhir Hasil Optimasi Topologi dengan Pertimbangan Manufaktur



Gambar 4. 11. Hasil Desain dengan Pertimbangan Manufaktur, (a) Material AISI 4140 (b) Material AISI 4340

Pada gambar 4.11 memperlihatkan hasil desain akhir dengan pertimbangan manufaktur pada kedua material. Pada material AISI 4140 yaitu sebelah kiri, memiliki massa akhir sebesar 41,27 Kg. Sementara itu pada material AISI 4340 memiliki massa akhir 38,52 Kg.



Gambar 4. 12. Hasil Tegangan *Von Mises* pada Desain dengan Pertimbangan Manufaktur

Analisis tegangan berdasarkan gambar 4.12 diketahui bahwa nilai von mises maksimal dari kedua desain dan material juga masih berada dalam batas kelayakan material. Pada material AISI 4140, tegangan maksimal berada pada angka 180,79 MPa, sedangkan pada material AISI 4340 berada pada angka 251,10 MPa dengan lokasi titik kritis tegangan masih berada pada tempat yang sama. Kemudian *Safety Factor* sebesar 3,61 pada material AISI 4140 dan 4,07 pada material AISI 4340.

Tabel 4. 4. Perbandingan Desain Akhir Hasil Optimasi Topologi dengan Pertimbangan Manufaktur

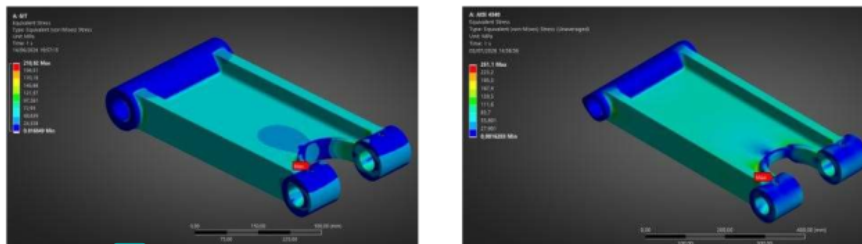
Pembandingan	AISI 4140	AISI 4340
Massa (Kg)	41,27	38,52
Tegangan Maksimum (MPa)	180,79	251,10
<i>Safety Factor</i>	3,61	4,07

4.2.6 Perbandingan Desain Awal dan Desain Akhir Hasil Optimasi Topologi dengan Pertimbangan Manufaktur



Gambar 4.13. Perbandingan Geometri (a) Desain Awal dan (b) Desain Optimasi

Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan geometri bucket link antara desain awal pada gambar sebelah kiri dan desain akhir hasil optimasi ditampilkan di sebelah kanan. Perbedaan yang terlihat terdapat pada pengurangan material di area lengkungan bagian depan, ketebalan main plate dan beberapa area yang tidak berkontribusi secara signifikan terhadap kekuatan struktur.



Gambar 4.14. Perbandingan Distribusi Tegangan Von Mises

Berdasarkan Gambar 4.14, distribusi tegangan von Mises pada desain awal dan desain hasil optimasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Pada desain awal diperoleh tegangan maksimum sebesar 218,82 MPa, sedangkan pada desain hasil optimasi meningkat menjadi 251,10 MPa atau mengalami peningkatan sebesar 14,75%.

Tabel 4.5. Perbandingan Desain Awal dan Desain Akhir Hasil Optimasi Topologi dengan Pertimbangan Manufaktur

Pembanding	Desain Awal	Desain Optimasi	Presentase Perubahan
Massa	56,38 Kg	38,52 Kg	31,68%
Tegangan Maksimum	218,82 MPa	251,10 MPa	14,75%
<i>Safety Factor</i>	2,98	4,07	36,58%

Hasil ⁴perbandingan antara desain awal dan desain hasil optimasi ditunjukkan pada Tabel 4.5. Massa bucket link mengalami penurunan dari 56,38 kg menjadi 38,52 kg, sehingga diperoleh pengurangan massa sebesar 31,68%. Pengurangan massa ini menunjukkan bahwa optimasi topologi berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan material tanpa mengurangi fungsi utama komponen. Selain itu, nilai safety factor meningkat dari 2,98 menjadi 4,07 atau mengalami peningkatan sebesar 36,58%, yang menunjukkan bahwa desain hasil optimasi memiliki tingkat keamanan yang lebih baik dibandingkan desain awal.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis terkait optimasi desain *bucket link* excavator kelas 20 ton, dapat dirumuskan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengurangan massa terbaik didapat dengan konfigurasi *percent to retain* 74,57% pada material AISI 4140 dengan massa akhir 42,11 Kg, sedangkan untuk material AISI 4340 berada pada *percent to retain* 82,15% dengan massa akhirnya 35,91 Kg. Kemudian pada desain dengan pertimbangan manufaktur untuk kedua material adalah 41,27 Kg dan 38,52 Kg. Perbandingan antara desain awal dan desain akhir hasil optimasi topologi dengan pertimbangan manufaktur menunjukkan adanya pengurangan massa sebesar 17,86 kg atau 31,68%, yaitu dari 56,38 kg menjadi 38,52 kg.
2. Analisis pembebanan pada *bucket link* hasil optimasi topologi untuk kedua material, yaitu AISI 4140 dan AISI 4340, menunjukkan bahwa tegangan maksimum masing-masing sebesar 205,63 MPa dan 227 MPa dengan nilai *safety factor* 3,17 dan 3,76. Sedangkan pada desain dengan pertimbangan manufaktur untuk kedua material adalah 180,79 MPa dan 251,10 MPa dengan *safety factor* 3,61 dan 4,07.
3. Berdasarkan hasil tersebut, material AISI 4340 dapat dinilai lebih unggul karena mampu menghasilkan massa yang jauh lebih ringan yaitu 35,91 Kg dibandingkan 42,11 Kg pada material AISI 4140. Oleh karena itu, AISI 4340 layak dipertimbangkan sebagai material pengganti yang lebih efisien untuk desain *bucket link*.

1

5.2 Saran

Sebagai tindak lanjut pengembangan penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran berikut:

1. Diperlukan pengujian eksperimental untuk memvalidasi antara hasil simulasi dengan hasil performa struktur pada kondisi nyata.
2. Dapat menggunakan metode atau perangkat lunak optimasi lainnya sebagai pembanding, sehingga hasil optimasi topologi dengan pendekatan SIMP pada ANSYS dalam penelitian ini dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.
3. Dapat menggunakan variasi material lain sebagai pembanding untuk memperoleh alternatif material lain yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, F.N. (2022) *Optimasi Topologi pada Desain Bucket Hydraulic Excavator Kapasitas 0,9 m³ Dengan Pendekatan Simulasi*.
- Beckwith, T.G. (2011) *Mechanical Measurements*. 6th edn. Prentice Hall.
- Bendsoe, M.P. and Sigmund, O. (2013) *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*. Springer.
- Boresi, A. P., Schmidt, R. J., and S. (2003) *Advanced Mechanics of Materials*.
- Budynas, R.G. and Nisbett, J.K. (2011) *Shigley's Mechanical Engineering Design*.
- Chen, J., Chen, Q. and Yang, H. (2021) 'Additive manufacturing of a continuum topology-optimized palletizing manipulator arm', (2013), pp. 289–304.
- Hibbeler, R.C. (2016) *Engineering Mechanics: Statics*. 14th edn. Pearson Prentice Hall.
- Huda, N., Mursid, O. and Akhmad, N. (2022) 'Studi Optimasi Topologi Pada Fall Block Deck Crane Kapasitas 30 Ton Menggunakan Metode Elemen Hingga'. Available at: <https://doi.org/10.23917/mesin.v23i1.15940>.
- Hussain, N. *et al.* (2020) 'Development of multi-physics numerical simulation model to investigate thermo-mechanical fatigue crack propagation in an autofrettaged gun barrel', *Defence Technology*, p. 13.
- Khurmi, R.S. and Gupta, J.K. (2005) *A Textbook of Machine Design*. 14th edn. Eurasia Publishing House (PVT.) Ltd.
- Komatsu Performance Handbook* (2019). Komatsu Ltd. Available at: <https://gams.net.au/wp-content/uploads/2022/06/Komatsu-Performance-Handbook.pdf>.
- Lebedev (2002) 'Assessment of Limiting Damage in Materials under Static Loading with the Account of a Stress State'. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1015354224871>.

- Madier, D. (2020) *Practical Finite Element Analysis for Mechanical Engineers*. 1st edn. FEA Academy.
- Nugraha, G. L., Ajis, M., Adhi, H. S., and Zakaria, D. (2024) 'Performance Improvement of Hydraulic Excavator Efficiency: A Literature Review.' Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.17509/jmai.v1i1.69947>.
- Prashant I Bhandari, Mruthunjaya S Alur and Dr. S N Kurbet (2016) 'Structural Analysis of Crawler Excavator Chassis using FEM', *International Journal of Engineering Research and*, V5(06), pp. 562–565. Available at: <https://doi.org/10.17577/ijertv5is060712>.
- R. B. Sarode, S.S.S. (2017) 'Topology Optimization of Excavator Bucket Link'.
- Rahman, A., Suryo, S.H. and Yunianto, B. (2022) 'Optimasi Desain dan Analisis Tegangan Bucket Excavator CAT 390F L', 10(2), pp. 207–216.
- Rider, M.J. (2015) *Design and Analysis of Mechanisms: A Planar Approach*. 1st edn. Ohio Northern University, USA.
- Sarode, R. and Sarawade, S.S. (2016) 'Structural Optimization of Excavator Bucket Link', *IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering (IOSRJMCE) e-ISSN*, (March 2016), pp. 10–16. Available at: www.iosrjournals.org.
- Sebayang, M.D., Max, S. and Silitonga, C. (2021) 'Investigation of effect of mechanical properties Investigation of effect of mechanical properties and Influence of Heat treatment on AISI 4140 steel'. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1013/1/012008>.
- Slocum, A. (2008) *FUNdaMENTALS of Design*. United States of American.
- Sutanto, W. *et al.* (2022) 'Optimasi Desain Boom Excavator Komatsu PC288US-3 Menggunakan Elemen Hingga dan Metode Topologi', 10(2), pp. 217–224.
- Wang, Y. *et al.* (2023) 'Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method', *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(20). Available at: <https://doi.org/10.3390/app132011336>.
- Wicaksono, D.S. (2021) *Analisa tegangan dan optimasi desain arm excavator tipe*

cat 320d menggunakan solidworks. Universitas Sanata Dharma.

Wilson, C. E., & Sadler, J.P. (2014) *Kinematics and Dynamics of Machinery*. Third Edit. Essex, England.

Wu, J., Sigmund, O. and Groen, J.P. (2021) 'Topology optimization of multi-scale structures : a review', pp. 1455–1480.

Zhang, H. *et al.* (2026) 'Scientific Reports Article in Press Topology optimization design of excavator working device based on equivalent static loads IN AR IN'.

Zienkiewicz, Taylor and Zhu (2013) *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*.

OPTIMASI DESAIN PADA BUCKET LINK EXCAVATOR KELAS 20 TON MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

ORIGINALITY REPORT

15%

SIMILARITY INDEX

13%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.upnvj.ac.id	Internet Source	4%
2	Submitted to Universitas Gadjah Mada	Student Paper	1%
3	repository.usd.ac.id	Internet Source	1%
4	jurnal.umk.ac.id	Internet Source	1%
5	repository.its.ac.id	Internet Source	1%
6	repository.ppns.ac.id	Internet Source	1%
7	repository.unisma.ac.id	Internet Source	1%
8	www.scilit.net	Internet Source	<1%
9	Nicky Yongkimandalan, Mochammad Dwi Julianto. "Parametric Design Optimization of Inner Chassis Retarder Bracket Using Finite Element Analysis", TURBO: Jurnal Program Studi Teknik Mesin, 2026	Publication	<1%
10	garuda.kemdikbud.go.id	Internet Source	<1%
11	text-id.123dok.com	Internet Source	<1%
12	Submitted to Konsorsium Perguruan Tinggi Swasta Indonesia II	Student Paper	<1%
13	library.binus.ac.id	Internet Source	<1%
14	positori.umsu.ac.id	Internet Source	

		<1 %
15	Submitted to Universitas Pendidikan Indonesia Student Paper	<1 %
16	123dok.com Internet Source	<1 %
17	MUHAMMAD AL HAZMAN, Siti Rahayuningsih, Alwi Sina Khaqiqi, Syafril Mayu Dinata. "ANALISIS MODIFIKASI TIE ROD pada JIB CRANE untuk MENINGKATKAN KAPASITAS ANGKAT MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA", INOVTEK Polbeng, 2026 Publication	<1 %
18	Submitted to Universitas Pamulang Student Paper	<1 %
19	core.ac.uk Internet Source	<1 %
20	Submitted to UPN Veteran Yogyakarta Student Paper	<1 %
21	eprints.untirta.ac.id Internet Source	<1 %
22	vanoesmof.blogspot.com Internet Source	<1 %
23	www.coursehero.com Internet Source	<1 %
24	www.gitam.edu Internet Source	<1 %
25	Submitted to Asia Pacific University College of Technology and Innovation (UCTI) Student Paper	<1 %
26	Submitted to Institut Teknologi Sumatera Student Paper	<1 %
27	aperta.ulakbim.gov.tr Internet Source	<1 %
28	www.scribd.com Internet Source	<1 %
29	Chongliang Huang, Lianyao Tang, Pengming Peng, Zhongxin Zhang, Jiaojiao Wang, Youchen Pan. "Lightweight optimization design of hydraulic excavator bucket arm based on Altair inspire", Journal of Physics: Conference Series, 2025 Publication	<1 %

30	es.scribd.com Internet Source	<1 %
31	id.scribd.com Internet Source	<1 %
32	Haykal Muzakki, Udin Komarudin, Adhita Prasetya. "Static Load Evaluation of Kaplan Turbine Shaft in Hydraulic Pump System Using Finite Element Analysis (FEA) Method", R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal, 2026 Publication	<1 %
33	Ucok Mulyo Sugeng, Deniyanto. "PERHITUNGAN LENGAN EXCAVATOR KAPASITAS 450 KG UNTUK LABORATORIUM", TEKNOSAINS : Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika, 2020 Publication	<1 %
34	educapes.capes.gov.br Internet Source	<1 %
35	repository.ub.ac.id Internet Source	<1 %
36	repository.unisba.ac.id:8080 Internet Source	<1 %
37	tekniksipil.id Internet Source	<1 %
38	Bagas Achmad Darmawan Bagas, Deri Teguh Santoso, Uji Burrahman, Rinaldi Suzatmiko, Edrianzah Rahmat. "Analisis Komparatif Struktural Statis Handle Rem Sepeda Motor Sebelum dan Sesudah Optimasi Topologi", ARMATUR : Artikel Teknik Mesin & Manufaktur, 2026 Publication	<1 %
39	Submitted to Liverpool John Moores University Student Paper	<1 %
40	adoc.pub Internet Source	<1 %
41	repository.umsu.ac.id Internet Source	<1 %
42	www.kemhan.go.id Internet Source	<1 %
43	www.mdpi.com Internet Source	<1 %
44	www2.hawaii.edu Internet Source	<1 %

<1%

Exclude quotes

☒ On

Exclude matches

☐ Off

Exclude bibliography

☒ On