
Analisis Desain *Boom, Arm, dan Bucket* Alat Peraga Mini *Excavator Zhugimada* dengan Metode Elemen Hingga

Braam Delfian Prihadianto^{1*}, Suryo Darmo², Dani Anggoro Hasan³, Suhada Nur Esa⁴

^{1,2,3,4}Departemen Teknik Mesin Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada,

^{1,2,3,4}Jl. Yacarana, Sekip Unit IV Yogyakarta 55281, Indonesia

E-mail: braam.delfian@ugm.ac.id¹, suryo.darmo@ugm.ac.id², dani.anggoro@ugm.ac.id³, suhadanuresa78@mail.ugm.ac.id⁴

Info Naskah:

Naskah masuk: 15 November 2023

Direvisi: 5 Januari 2024

Diterima: 9 Januari 2024

Abstrak

Excavator merupakan salah satu jenis alat berat dengan penggerak utamanya adalah sistem hidrolik dan seiring penggunaan dan perkembangannya membuat banyak pihak mengembangkannya sebagai sarana produksi maupun sebagai sarana pembelajaran. Kebutuhan dunia pendidikan terkait dengan *excavator* sebagai sarana pembelajaran dan media praktik hingga saat ini terkendala terkait harga jika menggunakan unit komersil, sehingga diperlukan media pembelajaran dengan bentuk yang lebih kompak tetapi tidak meninggalkan esensi utama pembelajaran. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis desain *front attachment* mini *excavator Zhugimada* dengan metode elemen hingga. Penelitian dilakukan dengan menggunakan aplikasi ANSYS untuk proses simulasi beban statis dan pengujian dilakukan dengan *bucket* berisi pasir seberat 25 kg dan menggunakan tiga buah silinder hidrolik. Hasil simulasi didapatkan nilai *von mises stress* maksimum terdapat pada *bucket* sebesar 43,226 MPa dan deformasi maksimum 0,51285 mm pada bagian *tooth bucket* sehingga secara umum desain komponen *front attachment* mini *excavator Zhugimada* dapat dinyatakan aman dapat dilanjutkan pada proses fabrikasi.

Keywords:

mini excavator;
front attachment;
bucket;
arm;
boom.

Abstract

An excavator is heavy equipment with a hydraulic system as the main drive and along with its uses, many parties have developed it as a means of production and as a means of learning. The education world needs excavators as learning tools and practice media are currently constrained by price when commercial units are used. Therefore, a learning media that is more compact but does not abandon the main essence of learning is needed. This research aims to analyze the front attachment design of the Zhugimada mini excavator using the finite element method. The research was carried out using the ANSYS application for the static load simulation process and testing was carried out with a bucket containing sand weighing 25 kg and using three hydraulic cylinders. The simulation results show that the maximum von Mises stress value in the bucket component is 43.226 MPa and the maximum deformation is 0,51285 mm in the tooth bucket so in general the design of the Zhugimada mini excavator front attachment components can be declared safe and can be continued in the fabrication process.

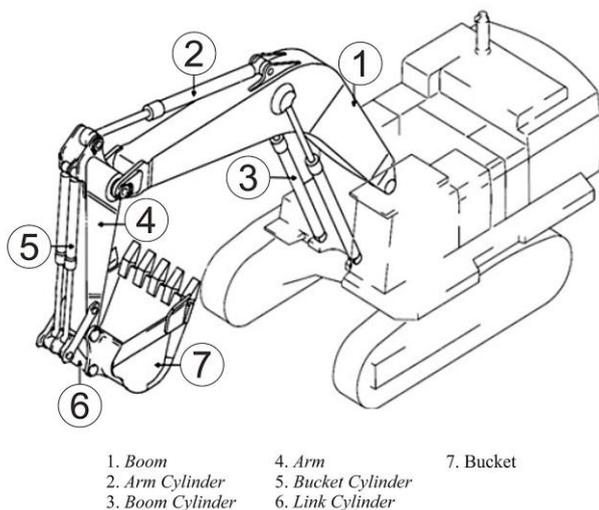
***Penulis korespondensi:**

Braam Delfian Prihadianto

E-mail: braam.delfian@ugm.ac.id

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi dan perkembangan zaman seiring dengan laju pertumbuhan populasi manusia membuat aktifitas semakin berkembang. Pemanfaatan tenaga manusia secara manual dengan alat-alat konvensional tidaklah efisien baik secara waktu maupun kuantitas hasil sehingga eliminasi tenaga manusia diperlukan untuk pekerjaan bidang konstruksi, pertambangan, dan perkebunan khususnya kegiatan pembukaan lahan yang meliputi aktivitas penggalian, penimbunan hingga pemindahan material. [1]. Salah satu peralatan yang dapat digunakan untuk membantu pekerjaan tersebut adalah *excavator* yang merupakan salah satu jenis alat berat dengan penggerak utamanya adalah sistem hidrolik. Sistem hidrolik pada *excavator* berfungsi sebagai penggerak dari beberapa bagian utama *excavator* seperti bagian front attachment yang meliputi *bucket*, *arm*, dan *boom*. [2]. *Excavator* hidrolik telah dikembangkan sejak tahun 1948 yang memiliki kelebihan dalam kemudahan kinerja dan pengoperasiannya [3]. Gambaran dan penjelasan bagian-bagian komponen *excavator* tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagian-bagian *Excavator* [4]

Seiring meningkatnya penggunaan *excavator* sehingga membuat beberapa pihak tertarik untuk mengembangkan *excavator* baik dalam ukuran besar maupun mini yang digunakan sebagai sarana produksi maupun sebatas sarana pembelajaran di dunia pendidikan. Salah satu faktor yang mendapatkan perhatian dalam pengembangan desain *excavator* adalah dimensi dan pemilihan material. Pengembangan desain dapat dilakukan berdasarkan analisa pembebanan yang meliputi pembebanan *impact*, *bending stress*, *shear stress*, *axial stress*, *buckling* dan pembebanan akibat tekanan hidrostatik. [5]. Penelitian terkait optimasi komponen *front attachment excavator* dilakukan pada boom unit Caterpillar 374D dengan metode elemen hingga dengan tiga jenis variasi posisi jangkauan maksimum yaitu. posisi jangkauan tinggi, jangkauan datar, dan jangkauan kedalaman. Hasil setelah dilakukan optimasi topologi diperoleh peningkatan nilai tegangan maksimum *von mises* antara 3,4-8,2 MPa. Sedangkan pada optimasi boom diperoleh reduksi massa sebesar 193-214 kg [6]

Material dari komponen *excavator* merupakan salah satu bagian pengembangan desain *excavator*. Optimasi boom *excavator* V EC650BE dilakukan dengan analisis *linear static* pada material HARDOX 400, S690QL dan SAILMA 450 HI. Nilai *von mises* pada desain sebelum optimasi adalah 372,3 MPa, 370,5 MPa, dan 370,4 Mpa untuk setiap variasi material. Dari hasil optimal diperoleh nilai *von mises* pada desain variasi pertama sebesar 370,6 MPa dan pada variasi kedua sebesar 374,4 MPa. Selain nilai *von mises*, optimasi tersebut juga menyebabkan terjadinya pengurangan massa sebesar 243 kg untuk desain pertama dan 289 kg pada desain variasi kedua [2].

Kebutuhan *excavator* pada dunia pendidikan khususnya pendidikan vokasi, hingga saat ini terkendala masalah harga jika menggunakan unit komersial untuk media praktik dan pembelajaran. Sehingga diperlukan media pembelajaran terkait *excavator* dengan bentuk yang lebih kompak tetapi tidak meninggalkan esensi utama dari *excavator*. Pembuatan media pembelajaran berupa *excavator* mini harus memenuhi persyaratan ditetapkan oleh masing-masing biro klasifikasi. Hal tersebut bertujuan supaya unit *excavator* memenuhi persyaratan terkait konstruksi yang meliputi kekuatan dan keindahan serta yang paling utama adalah jaminan keselamatan saat pengoperasian *excavator* tersebut. Yang diatur dalam persyaratan tersebut tidak terbatas pada konstruksi, tetapi juga mencakup material dan proses fabrikasinya seperti *fabrication*, *fit-up and welding process*. [7].

Berdasarkan latar belakang dan kajian pustaka yang telah disampaikan sebelumnya, penelitian ini fokus membahas terkait desain komponen *front attachment excavator* yang terdiri dari *bucket*, *arm*, dan *boom*. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis desain *front attachment* mini *excavator* Zhugimada yang terdiri dari komponen *boom*, *arm*, dan *bucket* dengan metode elemen hingga. Penelitian ini dilakukan supaya didapatkan desain *front attachment* yang memenuhi standar perancangan sehingga aman serta dapat dilanjutkan dengan proses fabrikasi alat peraga mini *excavator* Zhugimada.

2. Metode

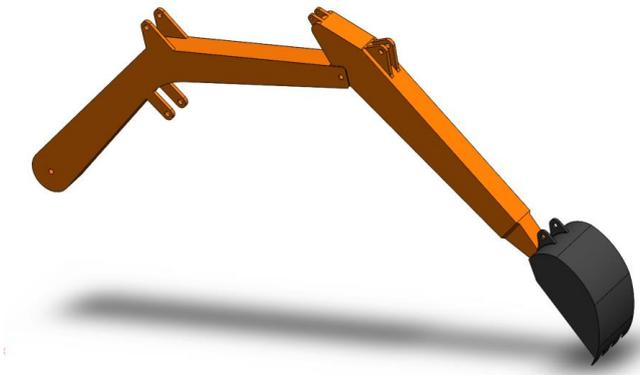
Desain komponen *bucket*, *arm*, dan *boom* dari mini *excavator* Zhugimada dibuat dengan menggunakan *software* CAD dengan material *mild steel*. Material jenis ini termasuk baja karbon rendah yang banyak digunakan untuk industri maupun untuk konstruksi karena memiliki sifat mampu las, mampu mesin, tangguh, dan relatif terjangkau dari segi biaya [8]. Rincian terkait *mechanical properties* material *mild steel* tersaji pada tabel 1 sedangkan desain serta spesifikasi *front attachment* mini *excavator* Zhugimada dapat dilihat pada gambar 2 dan tabel 2. Perancangan desain dilakukan dilakukan setelah menemukan konsep desain tepat dan sebelum pembuatan suatu objek bertujuan untuk memberikan gambaran desain yang akan dibuat. [9]. Penggunaan metode elemen hingga atau *finite element method* dalam perancangan *front attachment* dapat membantu dalam mengetahui bagian mana yang mendapatkan tekanan lebih besar [3].

Tabel 1. Mechanical Properties Mild Steel ASTM A36 [10]

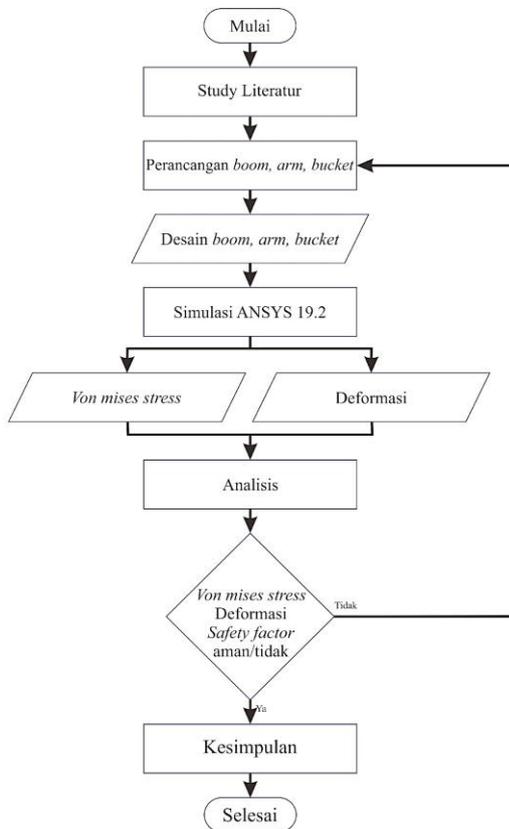
Mechanical Properties	Metric Unit
Ultimate Tensile Strength	400 – 550 MPa
Yield Strength	250 MPa
Modulus of Elasticity	200 GPa
Density	7,85 g/cm ³
Shear Modulus	79,3 GPa

Tabel 2. Spesifikasi Mini Excavator Zhugimada

Spesifikasi	Ukuran
Dimensi mini excavator (P x L x T)	3052,83 x 1100 x 1761 mm
Dimensi bucket (P x L x T)	553,56 x 255 x 234,77 mm
Dimensi arm (P x L)	1320 x 100 mm
Dimensi boom (P x L x T)	1638,46 x 110 x 646,51 mm

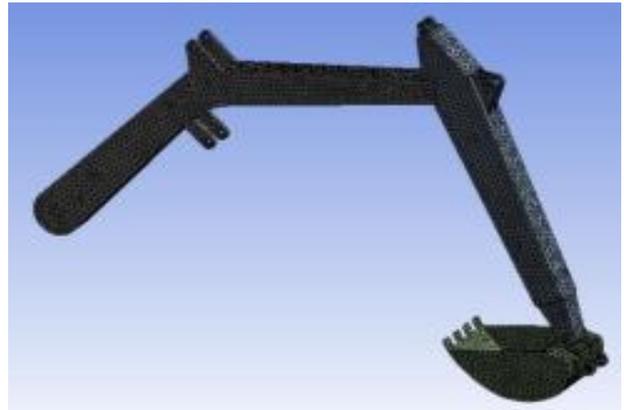


Gambar 2. Desain Front Attachment



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

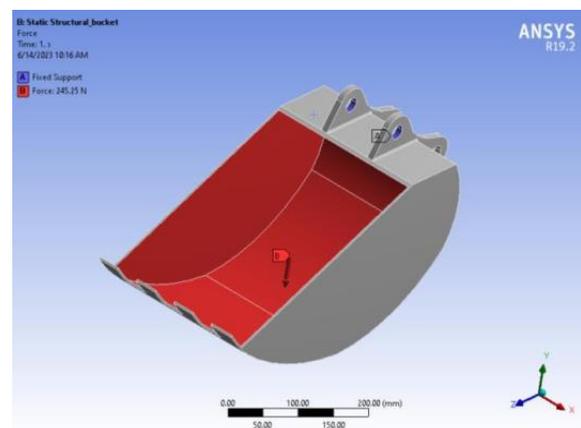
Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 3. Desain pada gambar 3 selanjutnya dianalisis dengan menggunakan metode elemen hingga menggunakan *Software* ANSYS 19.2. *Setting meshing* pada pengujian ini dengan menggunakan *default setting* yang tersaji pada gambar 4 dan pengujian pada dilakukan dengan asumsi *bucket* berisi pasir seberat 25 kg serta menggunakan 3 buah silinder hidrolik dengan berat total 15 kg untuk mengetahui *von mises stress* dan nilai deformasi yang terjadi dari desain *front attachment* tersebut.



Gambar 4. Meshing Desain Front Attachment

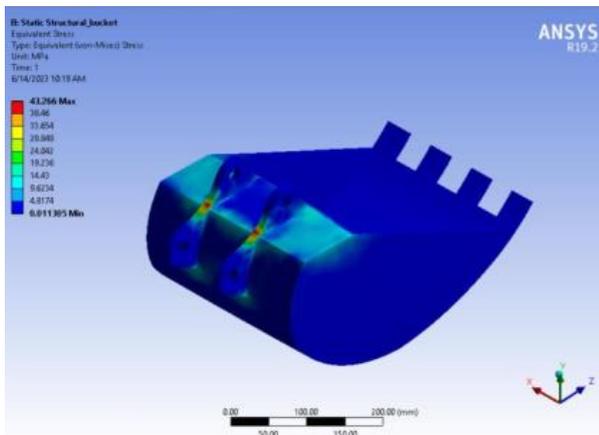
3. Hasil dan Pembahasan

Von mises stress adalah kumpulan gaya pada suatu permukaan *bend* yang nilainya dipengaruhi oleh luasan permukaan. Suatu permukaan dengan luasan yang kecil akan menghasilkan tegangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan luasan permukaan yang lebih besar dan diberikan nilai gaya yang sama. Penunjukkan nilai tegangan dilakukan dengan variasi warna, dimana warna merah menunjukkan bahwa area tersebut memiliki tegangan terbesar dan warna biru menunjukkan bahwa area tersebut memiliki nilai tegangan terkecil. Untuk area dengan nilai tegangan antara tegangan maksimal dan minimum ditunjukkan dengan warna kuning, hijau, dan biru muda [11]. Pada pengujian komponen *bucket*, pembebanan dilakukan dengan asumsi *bucket* terisi penuh pasir seberat 25 kg. Titik pembebanan diletakkan pada bagian tengah *bucket* seperti tersaji pada gambar 5.

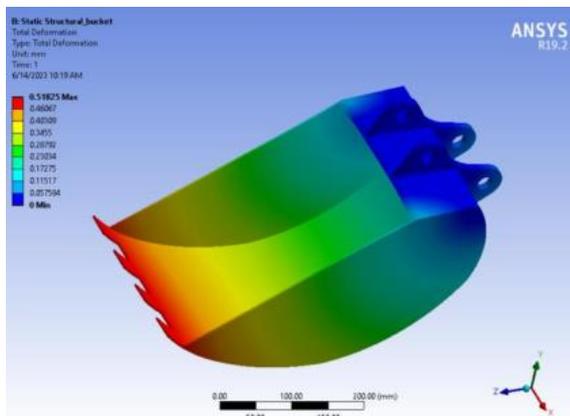


Gambar 5. Pembebanan Bucket

Hasil simulasi yang dilakukan pada *bucket* didapatkan nilai *von mises stress* berada pada nilai 0,011305 - 43,226 MPa dengan nilai *von mises stress* rata-rata adalah 2,0821 MPa.



Gambar 6. Hasil Simulasi *Von Mises Stress* Pada *Bucket*

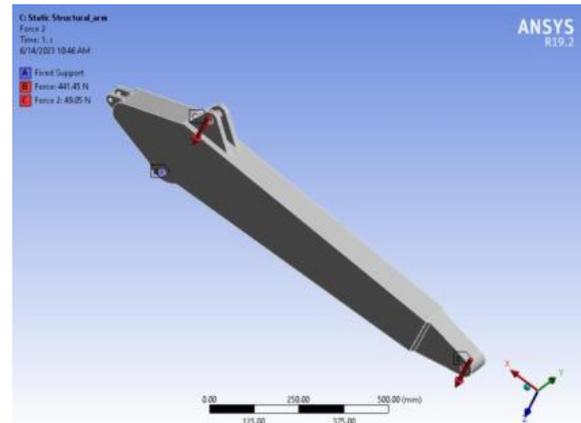


Gambar 7. Deformasi Pada *Bucket*

Pada gambar 6 tersaji distribusi nilai *von mises stress* pada *bucket* dan nilai *von mises stress* maksimum terdapat pada bagian *link bucket* yang berdekatan dengan komponen *arm*. Dari simulasi pada *bucket* didapatkan nilai deformasi rata-rata adalah 0,2099 mm dan nilai deformasi maksimum terjadi pada *tooth bucket* sebesar 0,51285 mm. Nilai deformasi hasil simulasi pada *bucket* bernilai lebih kecil jika dibandingkan pada desain lain dengan material sama yang memiliki nilai deformasi sebesar 1,2212 mm [12]. Hal tersebut terjadi karena terdapat perbedaan nilai dan titik pembebanan, pada simulasi ini nilai pembebanan yang diberikan untuk komponen *bucket* sebesar 245,25 N. Gambar persebaran deformasi pada komponen *bucket* tersaji pada gambar 7.

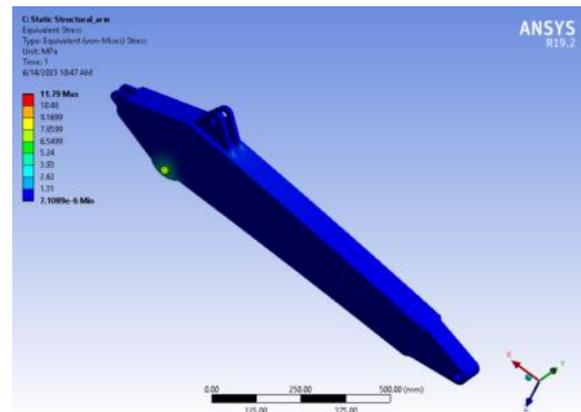
Pengujian selanjutnya dilakukan pada komponen *arm* dengan pembebanan yang dilakukan pada dua titik yaitu pada bagian yang berhubungan dengan *link bucket* dan pada bagian dudukan *bucket cylinder end pin*. Gaya yang bekerja pada titik pembebanan pada *link bucket* sebesar 441,45 N dan pada titik dudukan *bucket cylinder end pin* adalah 49,05 N. Posisi titik pembebanan pada komponen *arm* dapat dilihat pada gambar 8. Hasil simulasi yang dilakukan pada *arm* didapatkan nilai *von mises stress* berada pada nilai $7,1 \times 10^{-6}$

– 11,79 MPa dengan nilai *von mises stress* rata-rata adalah 0,41545 MPa.

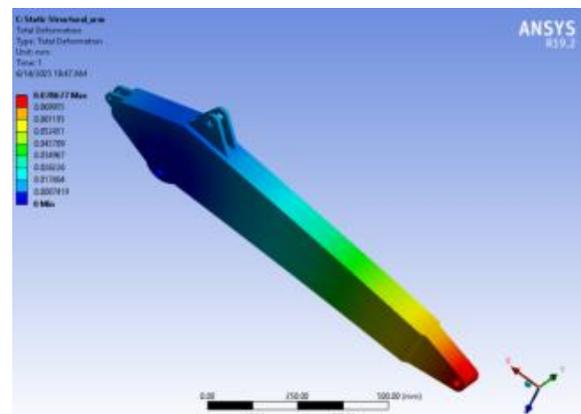


Gambar 8. Pembebanan *Arm*

Distribusi nilai *von mises stress* pada *arm* tersaji pada gambar 9 dan nilai *von mises stress* maksimum terdapat pada area yang berhubungan dengan *boom yoke pin*. Pada area yang berhubungan dengan *boom yoke pin* memiliki nilai *von mises stress* terbesar untuk komponen *arm* karena bagian tersebut memiliki luas penampang yang lebih kecil dibandingkan dengan *body arm* sehingga menghasilkan stress yang paling besar [13].



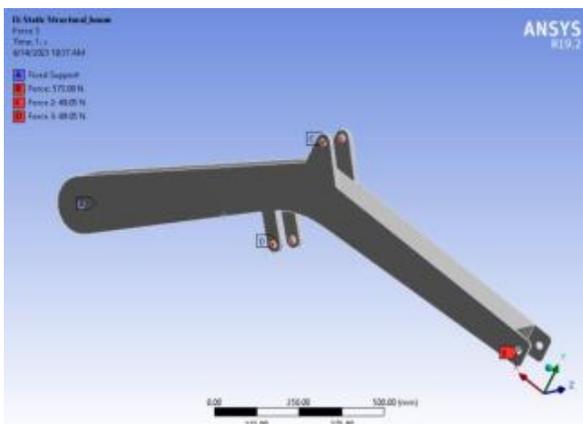
Gambar 9. Hasil Simulasi *Von Mises Stress* Pada *Arm*



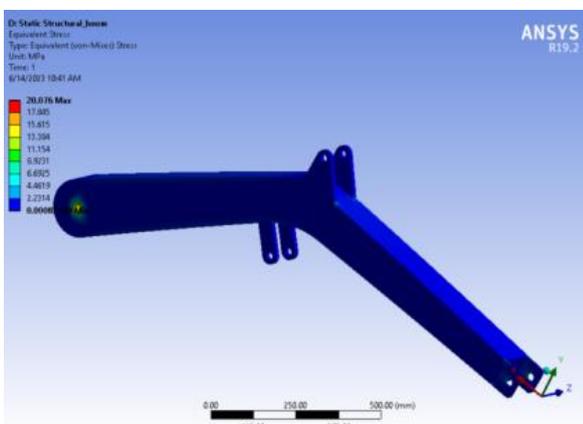
Gambar 10. Deformasi Pada *Arm*

Dari simulasi pada *arm* didapatkan nilai deformasi rata-rata adalah 0,0257 mm dan nilai deformasi maksimum terjadi pada bagian ujung *arm* atau area *link bucket* sebesar 0,07867 mm. Hal tersebut terjadi karena area ujung *arm* merupakan area yang berhubungan langsung dengan komponen *bucket* yang terkena *flexion torsional* [14]. Gambar persebaran deformasi pada komponen *arm* tersaji pada gambar 10.

Simulasi selanjutnya dilakukan pada komponen *boom* dengan pembebanan yang dilakukan pada tiga titik yaitu satu titik area *boom yoke pin* dan dua titik pada bagian dudukan *cylinder* yaitu *arm cylinder* dan *boom cylinder*. Gaya yang bekerja pada titik pembebanan pada *boom yoke pin* sebesar 573,88 N dan pada titik dudukan *cylinder* masing-masing sebesar 49,05 N. Posisi titik pembebanan pada komponen *boom* dapat dilihat pada gambar 11.



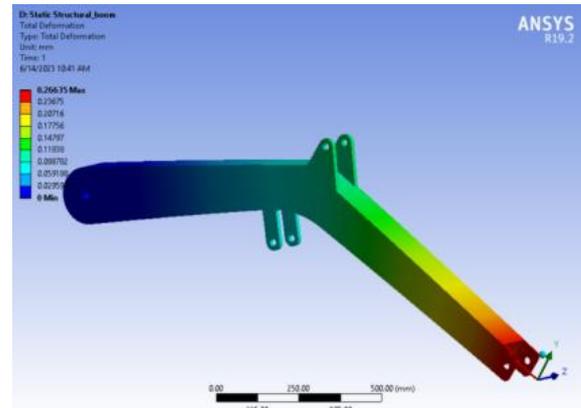
Gambar 11. Pembebanan Boom



Gambar 12. Hasil Simulasi Von Mises Stress Pada Boom

Hasil simulasi yang dilakukan pada *boom* didapatkan nilai *von mises stress* berada pada nilai $8,21 \times 10^{-4}$ – 20,076 MPa dengan nilai *von mises stress* rata-rata adalah 0,79196 MPa. Pada gambar 12 tersaji distribusi nilai *von mises stress* pada *boom* dan nilai *von mises stress* maksimum terdapat pada area yang berhubungan dengan *boom foot pin*. Dari simulasi pada *boom* didapatkan nilai deformasi rata-rata adalah 0,08799 mm dan nilai deformasi maksimum terjadi pada area *boom yoke pin* atau bagian ujung dari *boom* sebesar 0,26635 mm. *Boom* merupakan komponen utama pada *excavator* yang langsung terkena beban kerja dan kekuatan strukturnya akan berpengaruh terhadap keandalan serta

kinerja alat sehingga harus memiliki konstruksi yang kokoh, kuat, dan minim perubahan bentuk [15]. Gambar persebaran deformasi pada komponen *bucket* tersaji pada gambar 13.



Gambar 13. Deformasi Pada Boom

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan pada seluruh komponen *front attachment* mini *excavator* didapatkan nilai *von mises stress* berada rentang $7,1 \times 10^{-6}$ MPa hingga 43,226 MPa. Nilai *von mises stress* maksimum terjadi pada komponen *bucket* pada area sekitar *link bucket*. Pada komponen lainnya yaitu *arm* dan *boom*, nilai maksimum *von mises stress* berada pada area yang berhubungan dengan *pin*. Nilai *von mises stress* maksimum pada simulasi komponen *front attachment* mini *excavator* berada dibawah nilai *tensile strength* material *mild steel* ASTM A36 yang berada rentang 400-550 MPa dan nilai dan *yield strength* material *mild steel* ASTM A36 sebesar 250 MPa seperti tersaji pada tabel 1. Selain nilai *von mises stress* desain harus lebih kecil daripada *tensile strength* material yang digunakan, nilai faktor keamanan juga harus mendapatkan perhatian. Nilai faktor keamanan yang didapatkan dari simulasi pada penelitian ini adalah 5,78. Nilai tersebut didapatkan dengan membandingkan *yield strength* material dengan *von mises stress* [16].

Nilai deformasi rata-rata yang dihasilkan pada simulasi komponen *front attachment* mini *excavator* adalah 0,2099 mm untuk *bucket*, 0,0257 untuk *arm*, dan 0,08799 untuk *boom*. Nilai deformasi maksimum pada *front attachment* adalah sebesar 0,51285 mm dan nilai tersebut terdapat pada komponen *bucket*. Lokasi nilai deformasi maksimum berada pada bagian *tooth bucket* disebabkan karena pemuatan yang dilakukan secara terus menerus dan beban yang diterima oleh *tooth bucket* menyebabkan bagian tersebut rawan terjadinya *stress* [9]. Sedangkan nilai deformasi maksimum pada bagian *arm* dan *boom* terjadi pada area ujung masing-masing komponen, yaitu area *link bucket* dan area *boom yoke pin*.

Dari desain dan hasil simulasi yang telah dilakukan, secara umum desain sudah berada pada kondisi aman namun tetap diperlukan pengembangan dan perbaikan supaya desain lebih baik lagi. Metode perbaikan yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan metode optimasi baik dari sisi bentuk maupun ukuran dan optimasi penggunaan material [17]. Optimasi terhadap desain selain dapat memastikan *von mises stress* dan deformasi komponen

dalam keadaan aman juga dapat mereduksi massa komponen dan berakibat pada efisiensi biaya produksi [18].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan pada desain komponen *front attachment* mini excavator Zhugimada menggunakan metode elemen didapatkan nilai *von mises stress* maksimum sebesar 43,266 MPa pada komponen *bucket* bagian *link bucket* dan deformasi maksimum sebesar 0,51285 mm yang terjadi di komponen *bucket* pada bagian *tooth bucket*. Dengan hasil tersebut maka secara umum desain komponen *front attachment* mini excavator Zhugimada dapat dinyatakan aman dapat dilanjutkan pada proses fabrikasi.

Daftar Pustaka

- [1] A. Zarkasyi, Sariyusda, Jufriadi, and Hamdani, "Analisa Kerusakan Silinder Hidrolik Pada Excavator Hitachi EX 200 LC Dengan Metode Fishbone Di PT . Alhas Jaya Group," *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–4, 2019.
- [2] A. Fathurrahman, S. H. Suryo, and Muchammad, "Analisis Sifat Mekanik Dan Optimalisasi Struktur Boom Excavator V EC650 BE Menggunakan Metode Elemen Hingga," vol. 10, no. 3, pp. 405–414, 2022.
- [3] A. Sharma, "Recent Trends on Excavator Component Backhoe : A Review," *Int. J. Res. Eng. Appl. Manag.*, vol. 5, no. 2, 2019, doi: 10.35291/2454-9150.2019.0111.
- [4] E. Sutoyo, "Analisis Dimensi Dan Toleransi Pada Proses Rekondisi Silinder Hidrolik Arm Excavator," *J. Ilm. Tek. Mesin Teknik Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 13–21, 2017, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/230804380.pdf>.
- [5] W. Nirbito and D. K. Sainan, "Pengembangan Excavator Mini Amfibi Pengeruk Sampah Kapasitas Bucket 0,4 M3 Di Sungai Kecil," 2013, no. SNTTM XII, pp. 762–768.
- [6] D. P. Nugraha, S. H. Suryo, and M. Muchammad, "Optimasi Desain Topologi Struktur Boom Excavator CAT 374D L Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 3, pp. 385–392, 2022.
- [7] Rahmat, I. Iskandar, D. Purwanto, and R. Rahmaliya, "Analisa Keretakan Material Mounting Boom Hydrolic Axcavator Merk Hitachi ZX-470 LC-3F di PT . Darma Henwa Tbk Tambang Asam-Asam Kalimantan Selatan," vol. 4, no. 2, pp. 124–136, 2022.
- [8] O. M. Ikumapayi, I. P. Okokpujie, S. A. Afolalu, O. O. Ajayi, E. T. Akilabi, and O. P. Bodunde, "Effects of Quenchants on Impact Strength of Single-Vee Butt Welded Joint of Mild Steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 391, no. 1, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/391/1/012007.
- [9] A. D. Putra, M. Rohman, and A. Wahab, "Analisis Desain Excavator Bucket Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Material Baja," *TRANSMISI*, vol. 16, no. 2, pp. 65–68, 2020.
- [10] O. M. Ikumapayi *et al.*, "Effects of Heat Treatment on the Impact and Hardness Properties of Mild Steel [ASTM 36] Lap Welded Joint," in *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 309, pp. 1–8, doi: 10.1051/e3sconf/202130901078.
- [11] U. M. Sugeng and Deniyanto, "Perhitungan Lengan Excavator Kapasitas 450 KG Untuk Laboratorium," vol. 7, pp. 92–107, 2020.
- [12] H. S. M. Hutagalung, S. H. Suryo, and B. Yuniarto, "Evaluasi Kapasitas Bucket Dan Analisis Gaya Statis Pada Mini Hidrolik Backhoe Excavator CAT 302-CR," vol. 10, no. 1, pp. 95–102, 2022.
- [13] C. Margaretha and J. B. Ariatedja, "Analisis Kegagalan Excavator Arm pada Kondisi Operasi Hard Clay Soil," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 297–303, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.58305.
- [14] L. Solazzi, A. Assi, and F. Ceresoli, "Excavator arms : Numerical , experimental and new concept design," *Compos. Struct.*, vol. 217, no. 2019, pp. 60–74, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.096>.
- [15] C. Y. Meng, S. Fan, and L. L. Han, "The Finite Element Analysis of the Boom of 20-ton Backhoe Hydraulic Excavator Based on ANSYS," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 538, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/538/1/012037.
- [16] N. A. Sutisna and Z. Azhar, "Analisis Terhadap Desain Komponen Boom Pada Mini Excavator Excava 50 Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Mesin Indones.*, vol. 16, no. 2, pp. 1–6, 2021.
- [17] A. Sastranegara and Z. Azhar, "Design Improvement of Pindad Mini Excavator Boom using Finite Element Method," *J. Mech. Eng. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, p. 38, 2020, doi: 10.33021/jmem.v5i1.943.
- [18] W. Sutanto, S. Hadi Suryo, and B. Yuniarto, "Optimasi Desain Boom Excavator Komatsu PC288US-3 Menggunakan Elemen Hingga Dan Metode Topologi," *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 10, no. 2, pp. 217–224, 2022.