E-ISSN : 2988-1986
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 2 Tahun 2026

Analisis Kekuatan Boom pada Alat Peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA) *SolidWorks Simulation*

Fauzianisa Amalia[1], Tia Rahmiati[1]*, Dedi Junaedi[1]

[1)]Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok 16424

*Email: tia.rahmiati@mesin.pnj.ac.id

ABSTRACT

This study aims to analyze the structural strength of the boom in an EV (Electric Vehicle) Mini Excavator educational prototype using the Finite Element Analysis (FEA) method with SolidWorks Simulation. The research object is a boom made of ASTM A36 steel with a thickness of 2.5 mm, evaluated under static loading conditions representing actuator forces and maximum working loads. The analyzed parameters include von Mises stress, displacement, and factor of safety (FoS). The simulation results indicate a maximum von Mises stress of 108.916 MPa, which is below the 250 MPa yield strength of ASTM A36, confirming that the structure remains within the elastic region. The maximum displacement is 0.434 mm, indicating negligible deformation that does not affect the boom's structural performance. The minimum factor of safety is 2.295, exceeding the recommended safety limit for heavy equipment structures. The highest stress is concentrated around the boom base near the bearing hole due to geometric stress concentration. Therefore, the boom design is considered structurally safe under the simulated static loading conditions and suitable as a reference for future design development and further research.

***Keywords**: Finite Element Analysis, Boom, EV (Electric Vehicle) Mini Excavator, SolidWorks Simulation, ASTM A36.*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) berbasis SolidWorks Simulation. Objek penelitian berupa boom berbahan baja ASTM A36 dengan ketebalan 2,5 mm yang dianalisis melalui simulasi pembebanan statis menggunakan kombinasi gaya aktuator dan beban kerja maksimum. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan von Mises, displacement, dan factor of safety (FoS). Hasil

Article History
Received: Agustus 2026
Reviewed: Agustus2026
Published: Agustus 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

simulasi menunjukkan tegangan von Mises maksimum sebesar 108,916 MPa, masih berada di bawah yield strength ASTM A36 sebesar 250 MPa, sehingga struktur tetap berada pada daerah elastis. Nilai displacement maksimum sebesar 0,434 mm menunjukkan deformasi yang sangat kecil dan tidak memengaruhi fungsi struktural boom. Nilai factor of safety minimum sebesar 2,295 berada di atas batas aman yang direkomendasikan untuk struktur alat berat. Tegangan maksimum terkonsentrasi pada area pangkal boom di sekitar lubang bearing sebagai lokasi konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri. Berdasarkan hasil tersebut, desain boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator dinyatakan aman terhadap pembebanan statis yang disimulasikan dan layak digunakan sebagai dasar pengembangan desain maupun penelitian lanjutan.

Kata kunci: *Finite Element Analysis, Boom, EV (Electric Vehicle) Mini Excavator, SolidWorks Simulation, ASTM A36.*

1. PENDAHULUAN

Dalam Perkembangan teknologi alat berat dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan pergeseran yang signifikan dari sistem penggerak berbasis engine diesel konvensional menuju sistem penggerak elektrik (electric excavator). Transformasi tersebut didorong oleh meningkatnya tuntutan global terhadap efisiensi energi, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta implementasi konsep pembangunan berkelanjutan (sustainable development) pada sektor konstruksi dan pertambangan. Industri alat berat kini dituntut untuk menghasilkan produk yang tidak hanya memiliki produktivitas tinggi, tetapi juga mampu meminimalkan dampak lingkungan melalui pengurangan konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon. Oleh karena itu, pengembangan electric excavator menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung transisi menuju industri yang lebih ramah lingkungan sekaligus memenuhi target dekarbonisasi yang diterapkan di berbagai negara (Cheng et al., 2024).

Meskipun demikian, perubahan sistem penggerak tidak hanya berkaitan dengan penggantian sumber tenaga, tetapi juga menuntut adanya optimalisasi desain struktur mekanik pada setiap komponen utama excavator. Sistem penggerak elektrik memiliki karakteristik distribusi massa, kebutuhan daya, serta efisiensi energi yang berbeda dibandingkan sistem konvensional sehingga setiap komponen struktural harus dirancang agar memiliki kekuatan yang memadai dengan bobot serendah mungkin. Desain struktur yang terlalu berat (over-design) akan meningkatkan massa total alat sehingga kebutuhan energi untuk menggerakkan sistem menjadi lebih besar, sedangkan desain yang terlalu ringan (under-design) berpotensi menurunkan kekuatan struktur dan memperbesar risiko kegagalan selama operasi. Oleh karena itu, keseimbangan antara kekuatan struktur, berat komponen, dan efisiensi energi menjadi aspek yang sangat penting dalam proses perancangan electric excavator.

Penelitian yang dilakukan oleh (Zhang et al., 2024) menyatakan bahwa metode desain excavator konvensional masih menghadapi berbagai permasalahan, seperti desain yang berlebihan (over-design), konsumsi energi yang tinggi, serta emisi karbon yang besar sehingga belum mampu memenuhi kebutuhan transformasi industri manufaktur menuju konsep hijau dan rendah karbon. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa working device pada excavator menyumbang sekitar 20% dari total berat alat sehingga optimalisasi pada bagian ini memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap efisiensi penggunaan material, konsumsi energi, dan

performa operasional secara keseluruhan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan struktur working device menjadi salah satu fokus utama dalam perancangan electric excavator yang lebih efisien, ringan, dan berkelanjutan.

Sejalan dengan perkembangan tersebut, Program Pengembangan Produk Berbasis Laboratorium (PPBL) tahun 2026 mengembangkan sebuah prototipe Electric Excavator sebagai bentuk implementasi teknologi alat berat berbasis tenaga listrik. tipe ini dirancang sebagai purwarupa electric excavator yang diharapkan mampu menjadi alternatif penggunaan excavator berbasis engine diesel. Namun demikian, sebagaimana proses pengembangan produk rekayasa pada umumnya, setiap komponen penyusun prototipe perlu melalui tahapan evaluasi dan validasi desain secara menyeluruh sebelum memasuki proses fabrikasi maupun pengujian lapangan. Salah satu komponen yang memerlukan perhatian khusus adalah struktur boom sebagai elemen utama pada working device.

Boom merupakan komponen struktural utama yang menghubungkan upper structure dengan arm dan bucket serta berfungsi sebagai penopang seluruh mekanisme penggalian dan pengangkatan material. Selama proses operasi, boom menerima kombinasi beban statis maupun dinamis yang berasal dari berat sendiri komponen, gaya hidrolik, beban material, serta gaya akibat gerakan digging, lifting, dan swing. Besarnya pembebanan tersebut menyebabkan boom menjadi salah satu komponen yang mengalami distribusi tegangan paling tinggi dibandingkan komponen struktural lainnya pada excavator.

Apabila terjadi kegagalan pada struktur boom, konsekuensi yang ditimbulkan tidak hanya berupa penurunan produktivitas alat, tetapi juga dapat menyebabkan kecelakaan kerja, kerusakan komponen lain, penghentian operasi, serta meningkatnya biaya perawatan dan penggantian komponen. Risiko tersebut akan semakin besar apabila proses perancangan belum didukung oleh analisis kekuatan struktur yang memadai. Dalam praktik rekayasa modern, evaluasi terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan Factor of Safety (FoS) merupakan tahapan yang sangat penting untuk memastikan bahwa suatu desain mampu bekerja secara aman sesuai dengan kondisi pembebanan yang direncanakan.

Idealnya, desain boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator telah melalui proses verifikasi dan validasi kekuatan struktur sebelum dilakukan proses fabrikasi. Analisis tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh bagian boom mampu menahan beban kerja maksimum dengan nilai Factor of Safety yang memenuhi standar desain. Selain itu, proses optimasi struktur diharapkan mampu menghasilkan desain yang ringan namun tetap memiliki kekuatan yang memadai sehingga efisiensi energi sistem elektrik dapat dipertahankan. Dengan demikian, desain yang dihasilkan tidak mengalami over-design maupun under-design, melainkan mampu mencapai keseimbangan antara aspek kekuatan, berat, biaya manufaktur, dan efisiensi operasional.

Namun, pada kondisi aktual alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator belum memiliki hasil analisis struktural yang komprehensif mengenai distribusi tegangan, deformasi, maupun Factor of Safety pada komponen boom akibat pembebanan kerja. Belum tersedia informasi mengenai lokasi konsentrasi tegangan tertinggi, besar deformasi yang terjadi selama operasi, maupun tingkat keamanan struktur terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan material. Selain itu, area-area kritis seperti sambungan las, perubahan penampang, dan titik pemasangan silinder hidrolik berpotensi menjadi lokasi terjadinya konsentrasi tegangan yang belum teridentifikasi secara kuantitatif. Ketiadaan informasi tersebut menyebabkan tingkat keamanan desain boom belum dapat dibuktikan secara ilmiah sehingga diperlukan analisis lebih lanjut sebelum alat peraga digunakan pada tahap pengujian berikutnya.

Permasalahan tersebut menjadi dasar perlunya dilakukan analisis struktur menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA). Metode ini merupakan salah satu pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa untuk menganalisis perilaku struktur akibat

pembebanan tanpa harus melakukan pengujian fisik secara langsung. Dengan memanfaatkan SolidWorks Simulation, distribusi tegangan, deformasi, maupun Factor of Safety pada boom dapat diprediksi secara lebih cepat, efisien, dan akurat. Selain mengurangi biaya serta waktu pengembangan produk, metode FEA juga mampu mengidentifikasi titik-titik kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan sehingga dapat dijadikan dasar dalam melakukan optimasi desain sebelum proses fabrikasi dilaksanakan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik struktural boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator menggunakan metode Finite Element Analysis berbasis SolidWorks Simulation. Analisis difokuskan pada distribusi tegangan von Mises, deformasi maksimum, serta nilai Factor of Safety akibat pembebanan kerja yang direncanakan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi terhadap kelayakan desain boom, mengidentifikasi area yang berpotensi mengalami kegagalan struktur, serta memberikan rekomendasi teknis bagi pengembangan Alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator yang lebih aman, efisien, dan sesuai dengan prinsip rekayasa berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) yang menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui simulasi numerik dengan metode Finite Element Analysis (FEA) menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation. Pendekatan ini dipilih untuk menganalisis kekuatan struktur boom pada alat peraga Electric Vehicle (EV) Mini Excavator tanpa melakukan pengujian fisik secara langsung. Luaran penelitian berupa data kuantitatif yang meliputi tegangan von Mises, displacement, dan factor of safety (FoS) yang selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi kelayakan desain struktur.

Objek penelitian adalah komponen boom pada alat peraga EV Mini Excavator yang berfungsi sebagai struktur utama penahan beban. Model tiga dimensi boom dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks berdasarkan dimensi aktual alat peraga, kemudian dijadikan objek simulasi pada modul SolidWorks Simulation. Material yang digunakan adalah baja ASTM A36 dengan ketebalan 2,5 mm sesuai spesifikasi desain.

Data penelitian terdiri atas data primer berupa hasil simulasi Finite Element Analysis yang meliputi nilai tegangan von Mises, displacement total, dan factor of safety. Data pendukung diperoleh dari spesifikasi teknis alat peraga EV Mini Excavator serta properti mekanik material ASTM A36 yang digunakan sebagai parameter masukan pada simulasi.

Tahapan penelitian diawali dengan pembuatan model CAD tiga dimensi boom, dilanjutkan dengan penentuan sifat mekanik material ASTM A36 yang meliputi modulus elastisitas, rasio Poisson, massa jenis, yield strength, dan tensile strength. Selanjutnya dilakukan proses meshing menggunakan curvature-based solid mesh dengan kualitas tinggi (high quality mesh) untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat. Setelah itu ditentukan kondisi batas (boundary condition) berupa fixed support pada titik sambungan boom serta pembebanan statis yang merepresentasikan gaya aktuator dan beban kerja maksimum. Simulasi kemudian dijalankan menggunakan solver SolidWorks Simulation hingga diperoleh distribusi tegangan, deformasi, dan factor of safety.

Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai tegangan von Mises maksimum terhadap nilai yield strength material ASTM A36 untuk mengetahui tingkat keamanan struktur. Selanjutnya dianalisis distribusi tegangan guna mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan, mengevaluasi besar displacement yang terjadi, serta menilai nilai factor of safety sebagai indikator kelayakan desain boom terhadap pembebanan statis yang disimulasikan. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel, gambar kontur simulasi, serta pembahasan yang mengacu pada teori dan penelitian terdahulu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Spesifikasi

Penelitian ini menganalisis kekuatan struktur boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) berbasis SolidWorks Simulation. Simulasi dilakukan pada model tiga dimensi boom dengan nama model "Boom Excavator" melalui dua tahapan studi, yaitu Static 2 (tahap pemeriksaan meshing) dan Static 3 (tahap analisis pembebanan statik akhir yang digunakan sebagai acuan pembahasan von Mises stress, displacement, dan factor of safety). Spesifikasi umum studi simulasi disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Alat Peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator

Parameter	Nilai
Motor penggerak	BRT Elecetric
Kapasitas tangki hidrolik	20 Liter
Kapasitas baterai	72 Volt
Kapasitas bucket	10 Kg
Kelas	100 Kg
Kapasitas hidrolik	80 Kg

Dapat dilihat pada table 3.1 diatas ini adalah spesifikasi alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator.

Tabel 3.2 Spesifikasi Boom

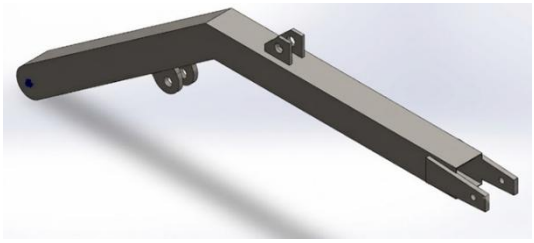
Parameter	Nilai
Panjang boom	1700 Mm
Tinggi profil penampang	100 Mm
Lebar profil penampang	96 Mm
Sudut tekuk struktur	145°
Tebal boom	2,5 Mm
Material	ASTM A36

Dapat dilihat pada table 3.2 diatas ini adalah spesifikasi boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator.

3.2 Model Input

Model 3D pada boom alat peraga EV mni excavator dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks, yaitu software pemodelan berbasis CAD (Computer-Aided Design). Model input berupa geometri solid tiga dimensi boom alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator yang

dimodelkan menggunakan fitur part modeling pada SolidWorks, kemudian diimpor ke modul SolidWorks Simulation untuk proses static analysis.



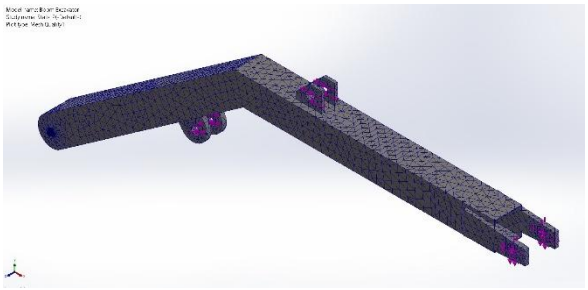
Gambar 3. 1 Model Input Boom
(Sumber: SolidWork)

Model tersebut kemudian diberikan constraint berupa fixture pada lubang bearing pangkal boom untuk merepresentasikan kondisi tumpuan aktual pada swing frame, sedangkan beban-beban kerja diterapkan pada bracket bawah, bracket atas, dan lubang pin arm sesuai dengan kondisi pembebanan riil pada alat peraga.

Material yang digunakan pada simulasi adalah baja ASTM A36 dengan sifat mekanik yang mengacu pada datasheet SolidWorks, yaitu yield strength sebesar 250 MPa (36.000 psi), ultimate tensile strength 400–550 MPa, modulus elastisitas 200 GPa, rasio Poisson 0,26, modulus geser ±79,3 GPa, massa jenis 7.850 kg/m^3, serta elongasi saat patah sebesar 20–23%. Sifat mekanik tersebut digunakan sebagai parameter masukan pada proses simulasi Finite Element Analysis (FEA) untuk mengevaluasi respons struktur boom terhadap pembebanan statis.

3.3 *Meshing*

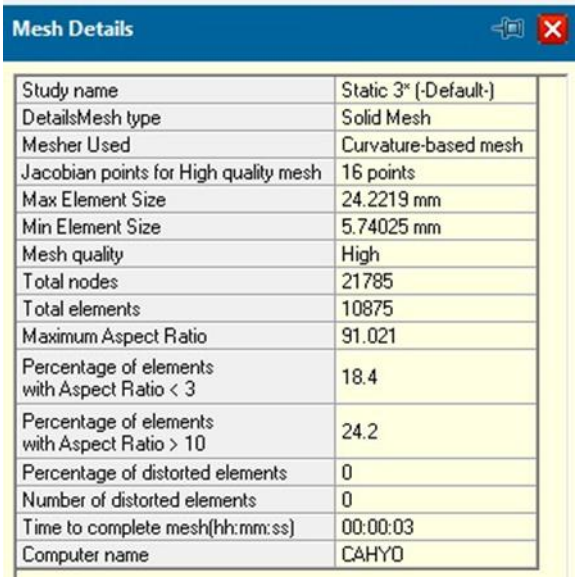
Meshing merupakan tahap diskritisasi geometri model menjadi elemen-elemen kecil (nodes dan elements) agar persamaan elemen hingga dapat diselesaikan secara numerik. Kualitas mesh sangat menentukan akurasi hasil simulasi; semakin baik kualitas mesh, semakin representatif hasil distribusi tegangan yang diperoleh (SDC Verifier, 2026). Pada penelitian ini digunakan solid mesh berbasis curvature (curvature-based mesh) dengan 16 titik Jacobian untuk mesh kualitas tinggi (high quality mesh).



Gambar 3.2 Hasil Meshing pada Boom
(Sumber: SolidWorks)

Dapat dilihat pada gambar 3.2 diatas adaalah hasil dari meshing pada Boom. Proses meshing (diskritisasi) geometri boom dilakukan menggunakan metode curvature-based mesh dengan kualitas mesh tinggi (high quality) pada solid mesh. Meshing merupakan tahap krusial dalam FEA karena distribusi dan kualitas elemen mesh secara langsung memengaruhi akurasi dan stabilitas hasil solver.

Proses *meshing* dilakukan menggunakan solid mesh dengan metode curvature-based mesh berkualitas tinggi (*high quality*) dan 16 *Jacobian points*. Parameter mesh yang digunakan meliputi ukuran elemen maksimum 24,2219 mm dan minimum 5,74025 mm, menghasilkan 21.785 *node* dan 10.875 elemen. Hasil evaluasi menunjukkan *aspect ratio* maksimum sebesar 91,021, dengan 18,4% elemen memiliki *aspect ratio* < 3 dan 24,2% > 10. Selain itu, tidak ditemukan elemen yang mengalami distorsi (0%), sehingga kualitas mesh dinilai memadai untuk menghasilkan simulasi yang akurat dengan waktu penyelesaian *meshing* selama 3 detik.


Mesh Details

Study name	Static 3* (-Default-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	24.2219 mm
Min Element Size	5.74025 mm
Mesh quality	High
Total nodes	21785
Total elements	10875
Maximum Aspect Ratio	91.021
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	18.4
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	24.2
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:03
Computer name	CAHYO

Gambar 3.3 Nilai Kualitas Meshing
(Sumber: *Solidworks*)

Terlihat bahwa mesh yang dihasilkan memiliki total 21.785 node dan 10.875 elemen dengan tingkat distorsi elemen sebesar 0%, yang mengindikasikan bahwa seluruh elemen mesh berada dalam rentang geometri valid untuk proses solving. Meskipun demikian, ditemukan bahwa 24,2% elemen memiliki aspect ratio lebih besar dari 10, dengan nilai aspect ratio maksimum mencapai 91,021. Kondisi ini secara teori dapat berpotensi menurunkan akurasi lokal hasil tegangan pada elemen dengan rasio tinggi tersebut, karena elemen yang terlalu memanjang (elongated) cenderung kurang sensitif dalam menangkap gradien tegangan yang tajam (Sorgente et al., 2023).

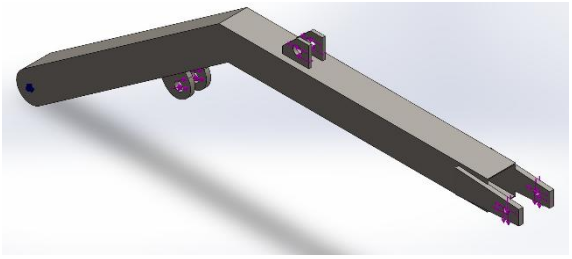
3.4 Penerapan Beban

Penerapan beban adalah proses pemberian, penempatan gaya atau muatan tertentu pada suatu struktur, material, dan benda uji dalam rangka menganalisis respons atau perilaku objek terhadap beban tersebut.

Tabel 3.3 Penerapan Beban pada 3D Modeling Boom

Lokasi Pembebanan	Besar Beban	Arah / Keterangan
Pangkal boom (bearing/engsel)	(fixture)	Ditahan menggunakan connector bearing sebagai tumpuan putar terhadap swing frame
Bracket bawah (bagian miring)	80 kg ≈ 784,8 N	Gaya dorong hidraulik boom cylinder, arah ke atas sejajar kemiringan bracket
Bracket atas	80 kg ≈ 784,8 N	Gaya dorong hidraulik arm cylinder, arah ke kiri sejajar sumbu boom
Pin arm (ujung boom) – vertikal	24 kg ≈ 235,4 N	Berat bucket, stick, dan tanah maksimum, arah ke bawah
Pin arm (ujung boom) – horizontal	80 kg ≈ 784,8 N	Gaya reaksi arah ke kiri, searah sumbu boom

(Sumber: SolidWorks)



Gambar 3.4 Titik dan Arah Penerapan Beban Pada 3D Modeling Boom

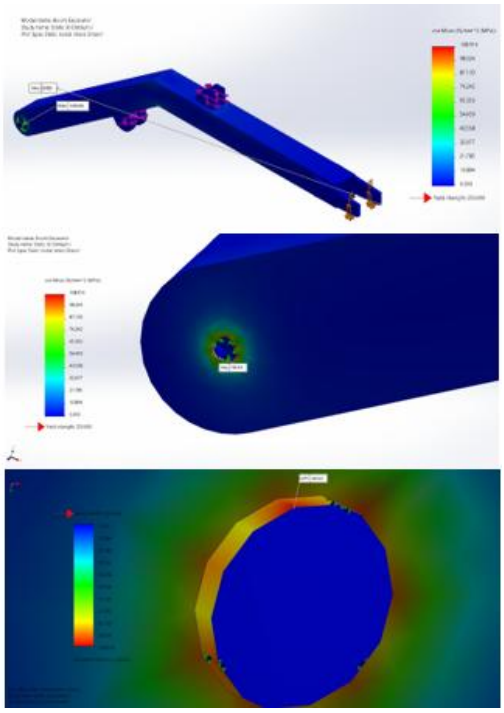
(Sumber: SolidWorks)

Penentuan titik tumpu pada pangkal boom menggunakan connector jenis bearing bertujuan untuk mensimulasikan kondisi sambungan pin-swing frame yang dapat berotasi namun tertahan secara translasi, sesuai dengan kondisi sambungan aktual pada excavator. Kombinasi beban pada bracket bawah, bracket atas, dan pin arm merepresentasikan skenario pembebanan terberat (worst case loading), yaitu saat boom menahan beban dorong hidraulik penuh secara bersamaan dengan beban angkat maksimum pada ujung stick dan bucket. Pendekatan pembebanan gabungan seperti ini lazim digunakan pada studi kekuatan struktur alat berat berbasis FEA untuk memperoleh kondisi tegangan kritis desain (Veeraprasad G. et al., 2023).

3.5 Von Mises

Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan von Mises pada boom excavator dengan nilai tegangan minimum sebesar 0,003 MPa dan tegangan maksimum sebesar 108,916 MPa. Tegangan maksimum terkonsentrasi pada area pangkal boom di sekitar lubang bearing, yaitu pada zona transisi geometri antara silinder pangkal dan badan boom, sebagaimana ditunjukkan

pada Gambar 4.5. Kondisi ini wajar terjadi karena area tersebut menahan reaksi tumpuan sekaligus momen lentur akibat kombinasi beban dorong hidraulik dan beban angkat pada ujung boom



Gambar 3.5 Hasil Tegangan Von Mises pada Boom

(Sumber: SolidWorks)

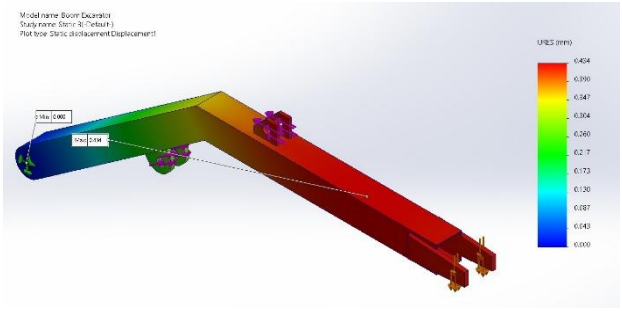
Kondisi Tegangan von Mises maksimum sebesar 108,916 MPa terjadi pada area di sekitar pangkal boom dan lubang pin, yaitu area transisi geometri (fillet dan lubang) yang secara umum menjadi lokasi konsentrasi tegangan (stress concentration) akibat perubahan penampang yang mendadak. Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa tegangan boom excavator terkonsentrasi pada bagian hinge (engsel) dan dudukan silinder hidraulik yang merupakan titik terlemah struktur (Meng et al., 2019).

Nilai tegangan maksimum 108,916 MPa masih berada jauh di bawah yield strength material sebesar 250 MPa, atau setara dengan sekitar 43,6% dari yield strength, sehingga secara teori struktur masih berada pada rentang deformasi elastis dan belum mendekati kondisi luluh (yielding). Nilai tegangan minimum yang mendekati nol (0,003 MPa) terjadi pada area yang jauh dari titik pembebanan dan tumpuan, yang merupakan hal yang wajar terjadi pada struktur dengan distribusi beban yang tidak merata di sepanjang boom.

3.6 Displacement

Hasil analisis perpindahan (displacement) menunjukkan nilai displacement minimum sebesar 0,000 mm pada area pangkal boom yang tertumpu bearing, dan displacement maksimum sebesar 0,434 mm yang mulai terjadi pada area setelah tikungan (bend) boom dan berlanjut hampir merata di sepanjang lengan lurus hingga ujung boom (area pin arm), sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.6. Pola sebaran displacement (URES) meningkat secara gradual dari warna biru (pangkal, ≈ 0–0,043 mm) menuju hijau-kuning di area tikungan boom (≈ 0,17–0,26 mm), lalu menjadi jingga-merah (≈ 0,35–0,434 mm) yang mendominasi seluruh lengan boom bagian bawah hingga ujung. Pola ini merupakan perilaku khas elemen

kantilever/lengan yang mendapat beban lentur dari ujung bebasnya, di mana lengan bagian bawah yang panjang dan ramping berdeformasi relatif seragam sebagai satu kesatuan kaku (rigid-like bending) dibandingkan area pangkal yang pendek dan tertahan bearing.



Gambar 3.6 Hasil Displacement pada Boom
(Sumber: SolidWorks)

Nilai displacement pada boom berkisar antara 0,000–0,434 mm. Displacement terendah (0,000–0,043 mm) berada pada pangkal boom (area bearing/tumpuan) yang ditunjukkan dengan warna biru, karena bagian ini mengalami pengekangan (fixture). Nilai displacement kemudian meningkat secara bertahap pada area transisi dan badan boom, ditunjukkan oleh perubahan warna dari biru muda, hijau, hingga kuning. Displacement maksimum sebesar 0,434 mm terjadi pada ujung boom (area pin arm) yang ditunjukkan dengan warna jingga tua hingga merah. Pola ini menunjukkan bahwa semakin jauh posisi dari titik tumpuan, semakin besar deformasi yang terjadi akibat pembebanan, namun nilai displacement yang dihasilkan masih sangat kecil sehingga tidak memengaruhi kinerja maupun integritas struktur boom.

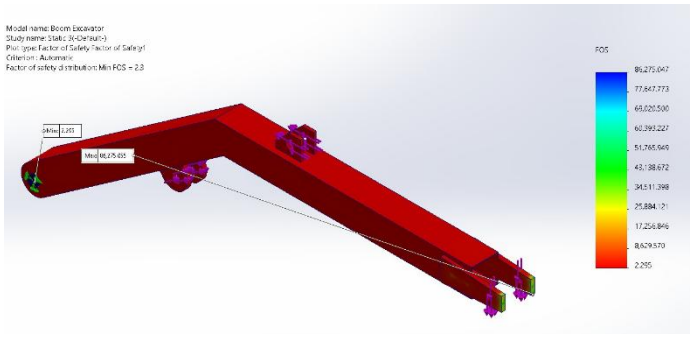
Nilai displacement berkisar antara 0,000 mm pada pangkal boom (area bearing) hingga 0,434 mm pada ujung boom (area pin arm). Nilai displacement maksimum tersebut tergolong sangat kecil sehingga menunjukkan bahwa struktur boom hanya mengalami deformasi elastis dan tidak memengaruhi fungsi maupun keselarasan (alignment) boom saat beroperasi. Hasil ini dipengaruhi oleh penggunaan material ASTM A36 yang memiliki modulus elastisitas sekitar 200 GPa, sehingga mampu memberikan kekakuan struktur yang baik terhadap pembebanan statis.

Prototipe sistem berhasil dirakit menggunakan breadboard dan kabel jumper. Sensor PIR ditempatkan pada posisi sehingga dapat mendeteksi gerakan manusia dalam ruang uji. Output relay disambungkan ke lampu LED sebagai simulasi beban. Mikrokontroler Arduino diprogram sesuai desain dan dihubungkan ke komputer untuk monitoring serial.

Sistem beroperasi sesuai harapan dengan lampu menyala otomatis saat sensor PIR mendeteksi gerakan dan mati saat tidak ada gerakan. Respon sistem cepat dan stabil selama pengujian berlangsung.

3.7 *Safety Factor*

Nilai factor of safety (FOS) dihitung menggunakan kriteria Automatic (Max von Mises Stress Theory) pada SolidWorks Simulation, yaitu perbandingan antara yield strength material terhadap tegangan von Mises yang terjadi pada tiap titik/elemen model (FOS = σyield / σvon Mises). Hasil simulasi menunjukkan nilai FOS minimum sebesar 2,295 yang terjadi pada area pangkal boom (titik dengan tegangan von Mises maksimum), sedangkan nilai FOS maksimum mencapai 86.275,055 pada area dengan tegangan sangat kecil.



Gambar 3. 7 Hasil Factor of Safety pada Boom
(Sumber: SolidWorks)

Nilai FOS minimum sebesar 2,295 tersebut sesuai dan konsisten dengan hasil perbandingan tegangan von Mises terhadap yield strength pada Tabel 4.4 (250 MPa / 108,916 MPa ≈ 2,295), yang menegaskan validitas hasil simulasi. Berdasarkan kriteria umum keamanan struktur pada studi FEA, suatu komponen dinyatakan aman apabila memiliki nilai FOS tidak kurang dari 1 (Rahmania et al., 2023). Selain itu, untuk komponen struktural alat berat yang menerima beban dinamis dan berulang seperti boom excavator, umumnya direkomendasikan nilai FOS minimum pada rentang 1,5 hingga 3 sebagai margin keamanan tambahan terhadap ketidakpastian beban kerja di lapangan (Veeraprasad G. et al., 2023).

Dengan demikian, nilai FOS minimum sebesar 2,295 yang diperoleh pada penelitian ini berada di atas batas aman minimum (FOS ≥ 1) dan juga memenuhi rentang rekomendasi keamanan struktur alat berat (1,5–3), sehingga dapat disimpulkan bahwa desain boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator dengan material ASTM A36 dinyatakan AMAN untuk menahan kombinasi beban kerja hidraulik dan beban angkat maksimum yang disimulasikan, tanpa berisiko mengalami kegagalan luluh (yielding failure).

3.8 Ringkasan Hasil

Pada saat pengujian, output serial monitor menampilkan status sensor dan lampu secara real-time sebagai berikut.

Tabel 3.4 Ringkasan Hasil Simulasi Boom

Parameter	Nilai Minimum	Nilai Maksimum	Status
Von Mises Stress	0,003 MPa	108,916 MPa	Aman (< 250 MPa yield)
Displacement	0,000 mm	0,434 mm	Aman (deformasi elastis kecil)
Factor of Safety	2,295	86.275,055	Aman (FOS > 1 & > 1,5)

(Sumber: SolidWorks)

Secara keseluruhan, hasil analisis Finite Element Analysis (FEA) menggunakan SolidWorks Simulation membuktikan bahwa struktur boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator dengan material ASTM A36 memiliki kekuatan struktural yang memadai untuk menahan seluruh skenario pembebanan kerja yang diujikan, dengan indikator tegangan von Mises yang masih jauh di bawah yield strength, displacement yang sangat kecil, dan nilai factor of safety yang berada di atas ambang batas aman yang direkomendasikan pada literatur.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis kekuatan struktur boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) berbasis SolidWorks Simulation yang telah diuraikan pada Bab IV, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1) Distribusi tegangan von Mises pada boom alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator menunjukkan nilai tegangan minimum sebesar 0,003 MPa dan tegangan maksimum sebesar 108,916 MPa. Tegangan maksimum terkonsentrasi pada area pangkal boom di sekitar lubang bearing, yaitu pada zona transisi geometri antara silinder pangkal dan badan boom. Temuan ini konsisten dengan pola konsentrasi tegangan pada studi boom excavator terdahulu yang menunjukkan bahwa tegangan maksimum umumnya terjadi pada area hinge (engsel) dan dudukan silinder hidraulik, yang merupakan titik terlemah struktur akibat perubahan penampang yang mendadak. Nilai tersebut setara dengan ±43,6% dari yield strength material ASTM A36 (250 MPa), sehingga struktur masih berada pada rentang deformasi elastis dan belum mendekati kondisi luluh (yielding).
2) Deformasi (displacement) maksimum yang terjadi pada boom tercatat sebesar 0,434 mm, yang muncul di sepanjang lengan bawah boom hingga area pin arm, sedangkan displacement minimum sebesar 0,000 mm terjadi pada area pangkal boom yang tertumpu bearing. Pola deformasi tersebut merupakan perilaku khas elemen kantilever yang menerima beban lentur dari ujung bebasnya. Nilai displacement maksimum ini tergolong sangat kecil dibandingkan panjang keseluruhan boom (1.700 mm), sehingga tidak berpotensi mengganggu fungsi kinematik maupun kelurusan (alignment) boom terhadap arm dan bucket.
3) Tingkat keamanan struktur boom yang dievaluasi melalui parameter Factor of Safety (FoS) menunjukkan nilai minimum sebesar 2,295 pada titik dengan tegangan von Mises tertinggi. Nilai tersebut berada di atas batas aman minimum yang disyaratkan pada studi FEA (FoS ≥ 1) dan juga memenuhi rentang faktor keamanan yang direkomendasikan untuk komponen struktural alat berat dengan beban dinamis dan berulang, yaitu 1,5 hingga 3 (Veeraprasad et al., 2023). Dengan demikian, desain boom pada alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator dengan material ASTM A36 dinyatakan aman terhadap kombinasi beban dorong hidraulik dan beban angkat maksimum yang disimulasikan, tanpa berisiko mengalami kegagalan luluh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menjawab seluruh pertanyaan penelitian yang diajukan dan membuktikan bahwa struktur boom alat peraga EV (Electric Vehicle) Mini Excavator hasil rancangan Program Pengembangan Produk Berbasis Laboratorium (PPBL) 2026 memiliki kekuatan struktural yang memadai untuk menahan beban kerja yang direncanakan, dengan tetap memperhatikan area kritis di sekitar pangkal boom sebagai titik yang perlu diawasi selama operasional

5. DAFTAR PUSTAKA

Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Proses Pack Carburizing Terhadap Laju Korosi Material Baja Karbon ASTM A36. (n.d.).

Andraș, A., Radu, S. M., Brînaș, I., Popescu, F. D., Budilică, D. I., & Korozsi, E. B. (2021). Prediction of Material Failure Time for a Bucket Wheel Excavator Boom Using Computer

Simulation. Materials, 14(24), 7897. https://doi.org/10.3390/ma14247897

Awwaluddin, M. (2019). Analisa Kekuatan Rangka Sepeda Listrik Menggunakan Software SolidWorks. Piston: Journal of Technical Engineering, 3(1), 5–16. https://doi.org/10.32493/pjte.v3i1.7486

Budynas, R. G., Nisbett, K. J., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2015). Shigley's mechanical engineering design (10. ed. in SI units). McGraw-Hill Education.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (n.d.). Materials Science and Engineering.

Cheng, M., He, J., Mu, H., Yan, X., Yang, J., Ou, J., Ding, R., Zhang, J., Xu, B., a State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China, b Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China, c State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China, a State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China, b Key Laboratory of Conveyance and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China, & c State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China. (2024). Opportunities and challenges of electrohydraulic control systems in the electrification era of non-road mobile machinery. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 4(2), 2024001–2024001. https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024001

Islam, S., & Perves, R. (n.d.). Influence of Element Types and Mesh Sizes on the Precision of Deflection Analysis in Finite Element Method for Civil Infrastructure Applications. 12(2).

Mechanics of Materials (10th Edition)—Hibbeler (1)_compressed-compressed. (n.d.).

Prihadianto, B. D., Darmo, S., Hasan, D. A., & Esa, S. N. (2024). Analisis Desain Boom, Arm, dan Bucket Alat Peraga Mini Excavator Zhugimada dengan Metode Elemen Hingga. Infotekmesin, 15(1), 165–170. https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v15i1.2124

Sajid, H. U., & Kiran, R. (2018). Influence of high stress triaxiality on mechanical strength of ASTM A36, ASTM A572 and ASTM A992 steels. Construction and Building Materials, 176, 129–134. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.018

Sorgente, T., Biasotti, S., Manzini, G., & Spagnuolo, M. (2023). A Survey of Indicators for Mesh Quality Assessment. Computer Graphics Forum, 42(2), 461–483. https://doi.org/10.1111/cgf.14779

Ulfah, N., Adicita, Y., Ariyanto, N. P., Puspita, R., Arifin, N. L., Wibowo, A., & Putra, R. D. E. (2025). Static Stress Simulation Analysis of Skid Frame of Portable Open Waste Container Using FEA Method on SolidWorks. Journal of Engineering Science and Technology Management (JES-TM), 5(2), 350–358. https://doi.org/10.31004/jestm.v5i2.315

Veeraprasad G., Srininvas I., Ramireddy K. V. S., Hemakumar H. V., & Srinivasa Rao V. (2023). Structural Analysis of the Differential Chassis for Development of Paddy Weeder Using Finite Element Analysis. International Journal of Plant & Soil Science, 35(22), 549–555. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i224164

Wu, H., Ding, X., Liu, G., Zhu, X., & Wang, H. (2025). Structural optimization of the excavator boom under extreme working conditions using EDEM–ADAMS coupled simulation. PLOS One, 20(11), e0337421. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0337421

Zhang, H., Ge, X., Li, Y., Shao, X., & Jia, M. (2024). Lightweight design of excavator working device based on automatically generated surrogate model. Scientific Reports, 14(1), 29756. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80882-5