SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KARAKTERISTIK TEGANGAN DAN DEFORMASI RANGKA MESIN PENGOLAH PUPUK TERINTEGRASI MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nouval Ramadhan[a], Wahyu Dwi Lestari[a]*

[a]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya 60294, Indonesia*

**Penulis korespondensi: wahyu.dwi.tm@upnjatim.ac.id; wahyudwilestarie@gmail.com, (W.D. Lestari) Tel.: +62 813-5940-2301*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 21 Agustus 2026
Direvisi pada 14 Oktober 2026
Disetujui pada 21 Oktober 2026
Tersedia daring pada 20 November 2026

Kata kunci:
Rangka mesin; analisis elemen hingga; tegangan von Mises; faktor keamanan; pupuk organik.

Keywords:
Machine frame; finite element analysis; von Mises stress; factor of safety; organic fertilizer.

ABSTRAK

Pengolahan pupuk organik berbahan kotoran hewan (KOHE) pada skala petani dan usaha kecil masih banyak dilakukan secara manual, terutama pada tahap penghancuran dan pencampuran, sehingga proses produksi menjadi kurang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi yang dirancang untuk mendukung proses penghancuran dan pengadukan KOHE. Metode yang digunakan adalah simulasi pembebanan statik dengan pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*. Material rangka menggunakan baja karbon ST 37 profil besi siku, dengan pembebanan total sebesar 449 N yang diberikan pada titik tumpu komponen utama, sedangkan kaki rangka ditetapkan sebagai tumpuan tetap. Hasil simulasi menunjukkan nilai tegangan maksimum (*Von Mises*) sebesar 15,4 MPa, perpindahan maksimum sebesar 0,0673 mm, dan nilai faktor keamanan sebesar 16,2. Nilai tegangan yang terjadi masih berada di bawah batas leleh material, sehingga menunjukkan bahwa struktur rangka aman secara statik terhadap pembebanan yang dimodelkan. Berdasarkan hasil tersebut, desain rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi layak dipertimbangkan untuk pengembangan lebih lanjut.

ABSTRACT

The processing of organic fertilizer made from animal manure (KOHE) at the farmer and small-scale business levels is still largely done manually, particularly during the crushing and mixing stages, resulting in an inefficient production process. This study aims to analyze the structural strength of an integrated fertilizer processing machine frame designed to support the crushing and mixing processes of animal manure. The method used is static loading simulation with a Finite Element Analysis (FEA) approach using SolidWorks software. The frame material consists of ST 37 carbon steel angle iron profiles, with a total load of 449 N applied at the support points of the main components, while the frame legs are defined as fixed supports. The simulation results show a maximum stress value (von Mises) of 15,4 MPa, a maximum displacement of 0,0673 mm, and a safety factor of 16,2. The resulting stress values remain below the material's yield strength, indicating that the frame structure is statically safe under the modeled loading. Based on these results, the design of the integrated fertilizer processing machine frame is worthy of consideration for further development.

1. PENGANTAR

Indonesia sebagai negara agraris memiliki produksi limbah organik yang sangat tinggi, terutama yang berasal dari sektor peternakan (Zahara, 2022). Kotoran hewan (KOHE) merupakan limbah organik yang banyak dihasilkan dari sektor peternakan dan memiliki potensi besar sebagai bahan baku pupuk organik. Pemanfaatan KOHE menjadi pupuk dapat meningkatkan nilai guna limbah sekaligus mendukung sistem pertanian berkelanjutan. Namun, pada banyak peternakan rakyat dan usaha kecil, proses pengolahan KOHE masih dilakukan secara sederhana sehingga kapasitas produksi rendah, membutuhkan tenaga kerja besar, dan memerlukan waktu proses yang relatif lama. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya penerapan mekanisasi pada proses pengolahan pupuk organik agar produktivitas dan efisiensi kerja dapat ditingkatkan (Nurhamidin dkk., 2019).

Pada umumnya, tahapan pengolahan KOHE meliputi proses penghancuran gumpalan material, pencampuran dengan bahan tambahan, dan persiapan fermentasi. Jika seluruh tahapan dilakukan secara manual, hasil campuran cenderung kurang merata, waktu kerja lebih panjang, dan kualitas produk sulit dikontrol secara konsisten (Ruitan dkk., 2023). Oleh karena itu, dibutuhkan mesin pengolah pupuk terintegrasi yang mampu menggabungkan fungsi penghancur dan pengaduk dalam satu sistem kerja. Penggunaan mesin terintegrasi diharapkan mampu mempercepat proses produksi, mengurangi beban kerja operator, serta meningkatkan keseragaman hasil olahan.

Dalam perancangan mesin tersebut, rangka merupakan elemen struktural utama yang berfungsi menopang seluruh komponen, seperti motor penggerak, *gearbox*, sistem transmisi, ruang penghancur, dan tabung pengaduk. Rangka juga berperan menjaga kestabilan mesin selama beroperasi ketika menerima beban statik maupun getaran kerja (Dzulfiqar dkk., 2021). Jika kekuatan rangka tidak memadai, maka dapat terjadi deformasi, perubahan posisi komponen, getaran berlebih, penurunan performa transmisi, hingga kerusakan struktural yang berpotensi membahayakan operator. Oleh sebab itu, desain rangka harus direncanakan secara cermat agar memiliki kekuatan dan kekakuan yang sesuai dengan kebutuhan operasional mesin (Eka dkk., 2023).

Beberapa penelitian sebelumnya telah memanfaatkan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi kekuatan struktur rangka mesin dan peralatan mekanis (Prasetiyo dan Sekarjati, 2022) menganalisis rangka mesin *power weeder* menggunakan *SolidWorks* dan menunjukkan bahwa simulasi mampu memprediksi distribusi tegangan, deformasi, serta faktor keamanan sebelum proses fabrikasi dilakukan. Bisono dkk. (2021) juga melakukan analisis kekuatan rangka mesin pencacah menggunakan simulasi statik dan menyatakan bahwa nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas luluh material sehingga desain dinilai aman untuk diproduksi. Selain itu, Sabtu dkk. (2024) menunjukkan bahwa metode FEA efektif digunakan untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada struktur rangka berbahan aluminium dengan variasi pembebanan..

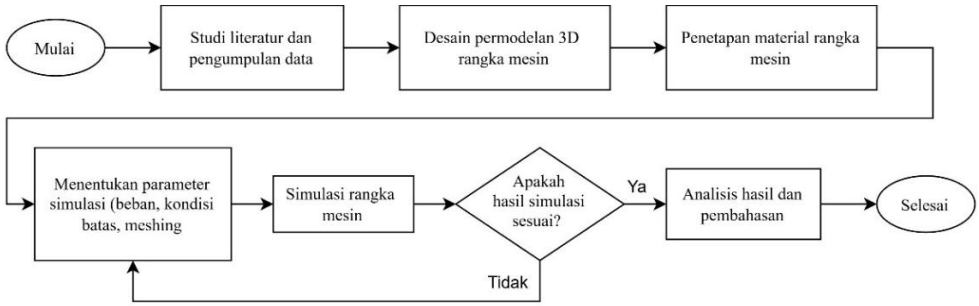
Kajian serupa mengenai efektivitas FEA pada perancangan rangka mesin pengolah pupuk dan limbah pertanian dikuatkan oleh Zaira dkk. (2026) melalui analisis pembebanan statik mesin pembuat pupuk abu, di mana simulasi *SolidWorks* terbukti akurat memetakan *displacement* dan batas *yield strength* material. Sejalan dengan hal tersebut, Esye dkk. (2024) mengevaluasi kekuatan rangka mesin pengolah pupuk organik dan pemilah sampah menggunakan FEA, yang mengonfirmasi bahwa analisis numerik dapat mencegah kegagalan struktur akibat *stress concentration* serta deformasi berlebih pada area penopang komponen utama. Di samping itu, simulasi elemen hingga pada rangka mesin pertanian dan industri sangat krusial untuk memastikan nilai tegangan *Von Mises* berada di bawah batas luluh material, sehingga terhindar dari deformasi plastis saat mesin beroperasi (Ibrahim, 2024). Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa FEA menjadi pendekatan penting dalam validasi desain rangka mesin modern.

Meskipun demikian, kajian mengenai analisis struktur rangka pada mesin pengolah pupuk organik terintegrasi, khususnya yang menangani bahan baku KOHE, masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada kualitas pupuk, proses fermentasi, atau pengolahan limbah secara umum, sedangkan evaluasi kekuatan rangka mesin belum banyak dibahas secara spesifik (Berardi dkk., 2025). Penelitian terdahulu belum mengkaji rangka yang menopang secara bersamaan dua motor bensin penggerak, *gearbox*, unit penghancur, dan unit pengaduk. Selain itu, pembebanan material kerja KOHE dan penilaian *displacement* terhadap batas defleksi izin belum dibahas secara eksplisit. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui analisis statik rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi yang berbeda dari penelitian terdahulu pada empat aspek. Dari sisi objek, penelitian ini menganalisis mesin pengolah KOHE yang menggabungkan fungsi penghancur dan pengaduk dalam satu rangka. Dari sisi konfigurasi, rangka dirancang menggunakan baja dengan profil *hollow* atau *U-channel*. Dari sisi kondisi pembebanan, rangka menerima pembebanan statik terdistribusi dari lima sumber beban, yaitu dua motor bensin penggerak, *gearbox*, unit penghancur beserta KOHE dalam kondisi penuh, dan unit pengaduk beserta KOHE, yang masing-masing dikenakan pada pelat dudukan komponen terkait. Dari sisi pendekatan analisis, penelitian ini mengevaluasi tegangan von *Mises*, faktor keamanan, dan *displacement* yang dibandingkan dengan kriteria batas defleksi izin berdasarkan ketentuan *serviceability* AISC 360.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi menggunakan simulasi pembebanan statik berbasis perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan *Von Mises*, perpindahan, dan faktor keamanan. Hasil penelitian diharapkan menjadi acuan dalam pengembangan mesin pengolah pupuk organik yang lebih efisien, aman, dan layak diterapkan pada skala petani maupun usaha kecil.

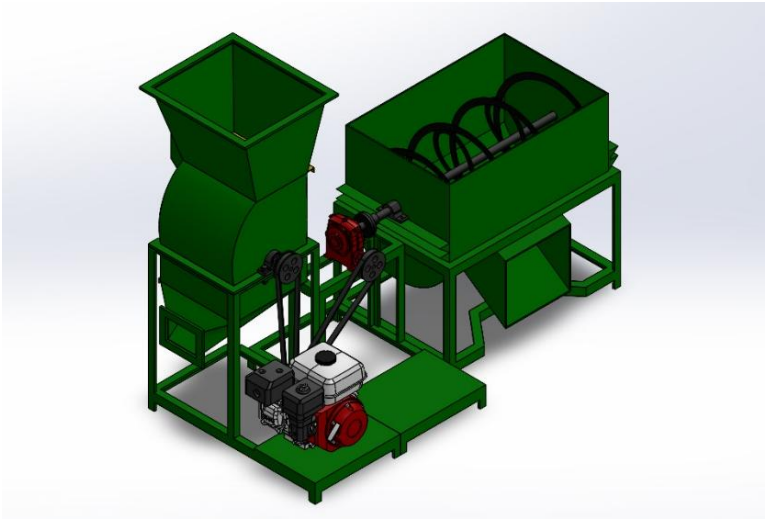
2. METODE

Penelitian dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga pada *SolidWorks Simulation*. Model tiga dimensi rangka dibangun berdasarkan geometri rancangan mesin, kemudian diberi sifat material, beban statik, dan kondisi tumpuan. Geometri didiskretisasi menjadi elemen hingga untuk memperoleh distribusi tegangan, perpindahan, dan faktor keamanan. Urutan kerja tersebut diperlihatkan pada Gambar 1. Evaluasi ini hanya mencakup kondisi pembebanan statik yang ditetapkan dalam model.



Gambar 1: Diagram alir penelitian

Objek simulasi adalah rangka penopang mesin pengolah pupuk yang menggabungkan unit penghancur dan pengaduk KOHE. Susunan komponen utama ditunjukkan pada Gambar 2. Kajian berfokus pada respons rangka, bukan pada unjuk kerja penghancuran, pencampuran, ataupun mutu pupuk yang dihasilkan.

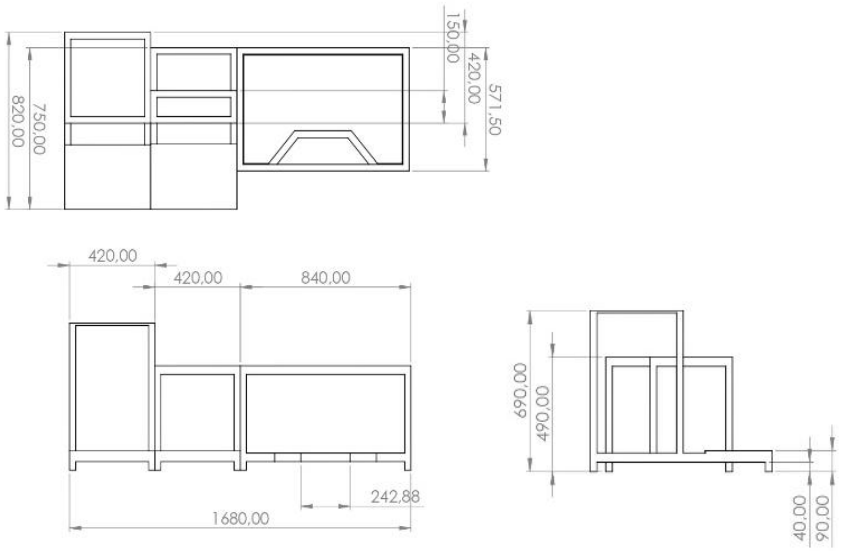


Gambar 2: Rancangan mesin pengolah pupuk terintegrasi yang memuat unit penghancur, pengaduk, transmisi, dan rangka

Model mesin pada Gambar 2 digunakan sebagai dasar penentuan posisi beban yang bekerja pada rangka. Evaluasi struktur kemudian dilakukan terhadap titik dudukan komponen yang menerima beban statik.

2.1 Desain Rangka Mesin

Rangka menumpu unit penghancur, unit pengaduk, dua motor bensin, kotak roda gigi, dan sistem transmisi. Unit penghancur ditempatkan pada salah satu sisi, sedangkan unit pengaduk pada sisi lainnya. Dimensi keseluruhan rangka adalah panjang 1.680 mm, lebar 820 mm, dan tinggi 690 mm. Geometri yang digunakan pada simulasi ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Geometri dan dimensi rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi.

Berdasarkan geometri rangka yang telah dirancang, tahap selanjutnya adalah mendefinisikan sifat mekanik material yang digunakan sebagai dasar analisis numerik. Material rangka menggunakan profil besi siku ukuran 40 × 40 × 4 mm. Dimensi utama rangka yang dimodelkan memiliki panjang 1680 mm, lebar 820 mm, dan tinggi 690 mm. Profil besi siku dipilih karena memiliki kekuatan yang cukup baik terhadap beban tekan dan lentur, mudah dipotong serta dilas, harga relatif ekonomis, dan mudah diperoleh di pasaran lokal. Selain itu, penggunaan besi siku lebih praktis untuk fabrikasi bengkel dibandingkan profil *hollow* atau *U-channel* yang memerlukan proses sambungan lebih kompleks pada beberapa titik konstruksi. Berikut spesifikasi rangka yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Spesifikasi Rangka

Parameter	Nilai
Material	Baja Karbon ST-37
Jenis Profil	Besi siku
Dimensi profil	40×40 mm
Ketebalan profil	4 mm
Panjang rangka	1680 mm
Lebar rangka	820 mm
Tinggi rangka	690 mm

Sumber: dokumen perancangan penulis

2.2 Material

Material rangka dimodelkan sebagai baja karbon ST 37 dengan asumsi material isotropik, homogen, dan berperilaku *linear elastic*. Properti mekanik yang digunakan mengacu pada pustaka material umum baja karbon rendah dan disesuaikan dengan parameter pada *SolidWorks Simulation*. Nilai modulus elastisitas yang digunakan sebesar 200 GPa, rasio *Poisson* 0,30, dan tegangan leleh (*yield strength*) sebesar 250 Mpa (Ghani dkk., 2024). Nilai ini digunakan secara konsisten pada seluruh tahapan simulasi untuk mengevaluasi batas aman struktur terhadap pembebanan yang diberikan. Pemilihan baja karbon ST 37 juga didasarkan pada pertimbangan kekuatan, ketersediaan, serta kemudahan dalam proses manufaktur. Material ini cukup mampu menahan beban tekan, tarik, maupun torsi yang timbul selama mesin beroperasi, sehingga cocok digunakan sebagai rangka penopang utama

2.3 Simulasi

Simulasi pembebanan statik dilakukan berbasis metode elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation. Pendekatan numerik ini bertujuan untuk memprediksi serta mengevaluasi respons mekanik struktur rangka akibat beban operasional sebelum proses fabrikasi fisik dilakukan. Tahapan simulasi mencakup penentuan kuantitas pembebanan, permodelan kondisi batas (boundary condition), diskretisasi geometri (meshing), serta penetapan kriteria evaluasi keamanan struktur

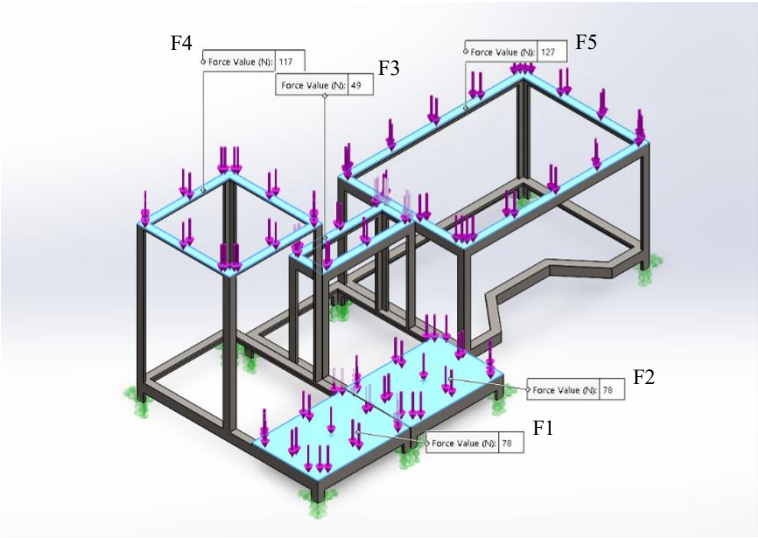
Pembebanan statis total sebesar 449 N diperoleh dari akumulasi estimasi berat komponen operasional utama dan material kerja (KOHE) yang ditopang oleh struktur rangka. Nilai gaya (F) dihitung menggunakan persamaan konversi F=m.g dengan percepatan gravitasi g=9,81 m/s^2. Sumber data massa komponen diperoleh dari lembar spesifikasi pabrikan (untuk motor bensin dan gearbox) serta fitur mass properties pada permodelan CAD SolidWorks untuk struktur unit penghancur dan pengaduk. Beban material kerja/KOHE pada kondisi kapasitas penuh telah diikutsertakan dan diakumulasikan ke dalam F4 (tabung penghancur + KOHE) dan F5 (tabung pengaduk + KOHE) dengan berat kotoran hewan dilakukan penimbangan secara langsung. Rincian dasar penentuan dan pembagian pembebanan statis disajikan secara sistematis pada Tabel 2.

Tabel 2: Pembagian Pembebanan

Sumber Beban		Beban (kg)	Gaya (N)
Motor bensin 1	(F1)	8	78
Motor bensin 2	(F2)	8	78
Gearbox	(F3)	5	49
Unit penghancur	(F4)	12	117
Unit pengaduk	(F5)	13	127
Total			449

Sumber: Dokumen pribadi

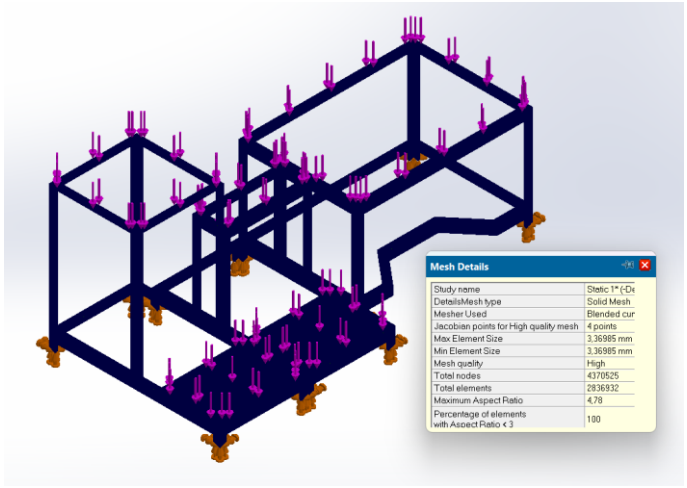
Visualisasi penempatan dan distribusi pembebanan statik pada model komputer tiga dimensi ditunjukkan pada Gambar 4. Indikator panah berwarna ungu mengarahkan distribusi gaya vertikal ke bawah yang bekerja secara simultan pada setiap titik peletakan komponen utama mesin.



Gambar 4: Lokasi dan arah pembebanan statik pada rangka mesin pengolah pupuk

Penetapan kondisi batas dilakukan untuk mengondisikan tumpuan serta membatasi pergerakan struktur agar sesuai dengan mekanisme kerja aktual di lapangan. Pada simulasi ini, keempat permukaan alas kaki bawah rangka ditetapkan sebagai tumpuan kaku *(fixed geometry)*. Pengkondisian ini secara matematis menghilangkan seluruh derajat kebebasan *(degrees of freedom)* baik translasi maupun rotasi pada area penopang dasar. Selain itu, sambungan antar-batang rangka yang direkatkan melalui proses pengelasan diasumsikan sebagai sambungan kaku sempurna *(rigid joint)*, sehingga mencegah terjadinya pergeseran relatif antar-elemen selama proses simulasi pembebanan berlangsung.

Diskretisasi model dilakukan untuk membagi geometri *continua* rangka menjadi elemen-elemen kecil berhingga (*finite elements*) melalui fitur *meshing SolidWorks Simulation*. Tipe elemen yang digunakan adalah *Solid Mesh* dengan algoritma *Blended Curvature-Based Mesh* pada tingkat kerapatan tinggi *(high quality mesh)*. Ukuran elemen maksimum dan minimum ditetapkan secara seragam sebesar 3,37 mm untuk menangkap kontur sambungan rangka secara akurat. Diskretisasi geometri ini menghasilkan jaring elemen sebanyak 4.370.525 node dan 2.836.932 elemen. Kualitas *meshing* dievaluasi melalui parameter rasio aspek, di mana diperoleh nilai *maximum aspect ratio* sebesar 4,78 dan 100% dari keseluruhan elemen memiliki *aspect ratio* di bawah 3. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa kualitas elemen *mesh* berada pada kategori sangat baik dan stabil untuk memproses iterasi perhitungan numerik. Parameter teknis *meshing* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5: Tampilan parameter mesh pada model rangka di *SolidWorks Simulation*

Kinerja struktur pada model statik dievaluasi dari tegangan ekuivalen, perpindahan, dan faktor keamanan. Faktor keamanan terhadap luluh dihitung dari rasio tegangan luluh asumsi material terhadap tegangan *von Mises* maksimum. Nilai yang lebih besar dari satu mengindikasikan bahwa tegangan terhitung masih di bawah batas luluh pada konfigurasi simulasi, tetapi tidak dengan sendirinya membuktikan keselamatan mesin pada seluruh kondisi operasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kekuatan struktur rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi dilakukan melalui simulasi pembebanan statik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Pembebanan statik yang dimodelkan adalah sebesar 449 N, yang merupakan akumulasi berat total dari komponen operasional mesin seperti motor bensin, *gearbox*, unit penghancur, dan unit pengaduk. Evaluasi kekuatan struktur berfokus pada tiga parameter utama, yaitu tegangan *Von Mises*, perpindahan (*displacement*), dan faktor keamanan.

Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur rangka mampu menahan pembebanan statik yang diberikan dengan respons mekanik yang tetap berada dalam batas aman elastis material baja ST 37. Rekapitulasi nilai parameter utama beserta lokasi kritis hasil simulasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3: Rekapitulasi hasil simulasi statik rangka

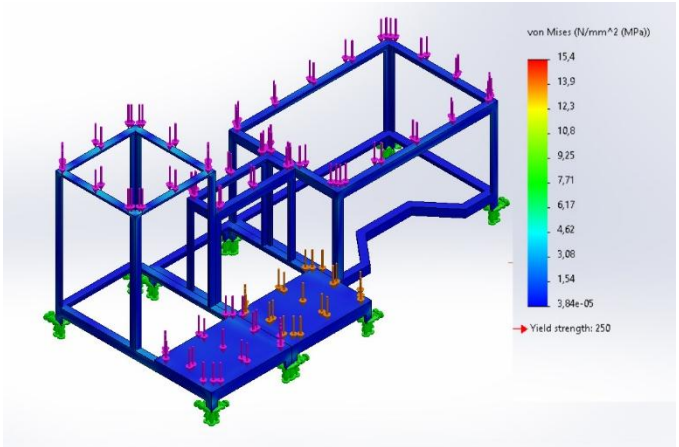
Parameter	Nilai	Lokasi Kritis
Tegangan Maksimum	15,4 MPa	Sambungan dudukan unit penghancur dan batang vertikal rangka
Displacement maksimum	0,0673 mm	Ujung dudukan unit pengaduk
Minimum *Safety Factor*	16,2	Area dengan tegangan maksimum

Sumber: Keluaran simulasi yang dilaporkan penulis

Berdasarkan Tabel 3, tegangan maksimum sebesar 15,4 MPa berada di bawah nilai tegangan luluh input 250 MPa. Perpindahan maksimum tercatat 0,0673 mm dan faktor keamanan minimum 16,2. Angka tersebut mendukung kesimpulan terbatas bahwa model tidak mencapai kondisi luluh pada beban statik yang diterapkan. Penjelasan rinci lokasi tegangan maksimum dan perpindahan disajikan pada subbagian berikut.

3.1 Simulasi von Mises

Tegangan ekuivalen *von Mises* digunakan untuk menunjukkan bagian struktur dengan respons tegangan terbesar dan membandingkannya dengan batas luluh material. Sebaran tegangan pada rangka dapat dilihat pada Gambar 6. Identifikasi area kritis dari simulasi perlu dikonfirmasi apabila sambungan dan pembebanan aktual berbeda dari asumsi model.



Gambar 6: Distribusi tegangan ekuivalen *von Mises* hasil simulasi rangka.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan *von Mises* maksimum yang terjadi pada struktur rangka sebesar 15,4 MPa. Nilai tegangan tersebut terlokalisasi pada sambungan rangka atas unit penghancur, khususnya pada pertemuan antara batang horizontal dan

batang vertikal. Daerah ini menjadi lokasi kritis karena menerima akumulasi pembebanan dari unit penghancur sekaligus mengalami perubahan geometri pada sambungan, sehingga memunculkan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya.

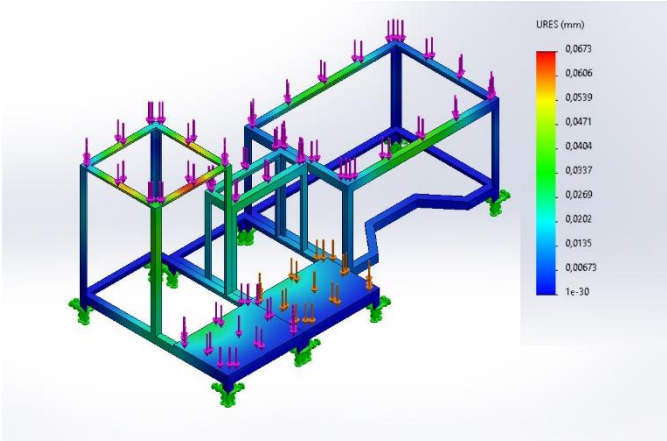
Apabila dibandingkan dengan *yield strength* baja ST-37 sebesar 250 MPa, tegangan maksimum hasil simulasi hanya sekitar 6,48% dari batas luluh material. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur bekerja sepenuhnya pada daerah elastis, sehingga tidak berpotensi mengalami deformasi permanen selama menerima pembebanan statik yang dimodelkan.

Terkonsentrasinya tegangan pada area sambungan las ini sejalan dengan temuan Rohman dkk, (2023) pada analisis struktur rangka mesin pengolah dan pemilah sampah berbasis FEA, yang menunjukkan bahwa pertemuan antar-profil yang dilas secara kaku (*rigid joint*) umumnya menjadi titik utama konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri yang mendadak dan akumulasi gaya dari unit kerja. Tegangan puncak sebesar 15,4 MPa pada rangka ini tergolong rendah dibandingkan hasil simulasi rangka mesin pembuat pupuk (Zaira dkk., 2026), yang melaporkan tegangan hingga puluhan MPa pada daerah dudukan motor, meskipun perbedaan konfigurasi dan pembebanan antar-struktur perlu diperhatikan dalam perbandingan ini.

Oleh karena tegangan yang diperoleh masih sangat rendah, sambungan rangka saat ini belum memerlukan penambahan pengaku (*gusset plate*). Namun, apabila pada pengembangan selanjutnya mesin dirancang untuk kapasitas yang lebih besar atau menerima pembebanan dinamis, penambahan pengaku pada area sambungan tersebut dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kekakuan struktur. Selain distribusi tegangan, evaluasi terhadap perpindahan struktur juga diperlukan untuk mengetahui tingkat kekakuan rangka selama menerima pembebanan statik.

3.2 Simulasi Displacement

Perpindahan total menggambarkan perubahan posisi titik pada rangka akibat gaya yang diterapkan. Parameter ini berkaitan dengan kekakuan dan dapat digunakan untuk meninjau kemungkinan perubahan keselarasan komponen mesin (Tabayyun, 2025). Hasil distribusi perpindahan ditunjukkan pada Gambar 7.



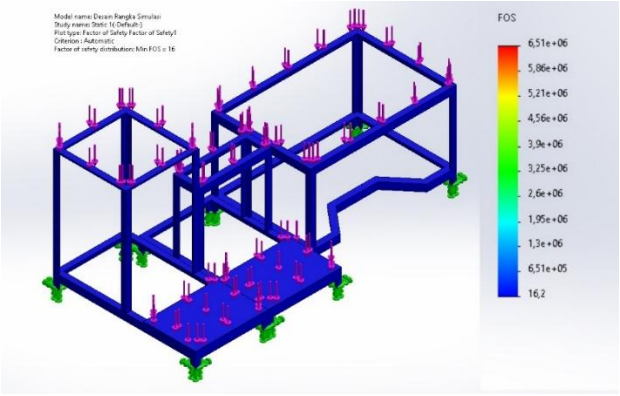
Gambar 7: Distribusi perpindahan total pada rangka hasil simulasi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum struktur sebesar 0,0673 mm seperti yang terlihat pada Gambar 7. Nilai tersebut terjadi pada bagian dudukan unit penghancur dengan bentang rangka sebesar 420 mm, yaitu area yang menumpu beban besar pada struktur sebesar 117N. Kriteria penerimaan *displacement* mengacu pada ketentuan *serviceability* AISC 360 (Bab L), yang menyerahkan penetapan batas defleksi kepada perancang sesuai fungsi struktur. Dalam penelitian ini digunakan batas defleksi izin sebesar L/360 sebagai nilai acuan konservatif yang lazim digunakan untuk balok baja, sehingga untuk bentang L = 420 mm diperoleh batas defleksi izin sebesar 1,17 mm. *Displacement* hasil simulasi 0,0673 mm hanya sekitar 5,8% dari batas tersebut, sehingga memenuhi kriteria dengan margin yang besar. Dengan demikian, perubahan bentuk selama menerima pembebanan statik dapat diabaikan dan tidak memengaruhi posisi komponen utama seperti motor penggerak, *gearbox*, sistem transmisi, unit penghancur, maupun pengaduk. Rangka dinilai memiliki kekakuan yang memadai terhadap pembebanan yang diberikan.

3.3 Simulasi Safety Factor

Faktor keamanan minimum menggambarkan margin terhadap batas luluh material pada model yang dihitung. Pada pendekatan ini, faktor keamanan diperoleh dari perbandingan tegangan luluh input material terhadap tegangan ekuivalen *von Mises* maksimum. Persamaan (1) digunakan untuk menyatakan perhitungan tersebut.

$$FoS = \sigma y / \sigma vM,maks = 250 / 15,4 = 16,2 \quad (1)$$



Gambar 8: Hasil simulasi *safety factor* rangka mesin

Berdasarkan Gambar 8, faktor keamanan minimum dilaporkan sebesar 16,2. Nilai ini konsisten dengan hasil pembagian 250 MPa terhadap 15,4 MPa. Pada model yang digunakan, nilai tersebut berada di area sambungan dengan tegangan maksimum. Margin terhadap luluh yang besar pada kasus statik tidak mencakup ketahanan lelah, kemampuan sambungan las, kestabilan struktur, atau kejadian beban tak terduga.

Faktor keamanan 16,2 pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian rangka mesin pengolah bahan lain yang dianalisis secara statik, yaitu 15 pada Widodo dan Nuryosuwito (2024). Sebaliknya, Pranugraha dan Solikin (2026) melaporkan faktor keamanan minimum hanya 1,28 pada batang rangka atas depan, sementara bagian rangka lain memiliki nilai di atas 26 sehingga sebagian rangka dinilai berlebih (*over-design*). Sebaran nilai tersebut menunjukkan bahwa rangka mesin pengolah bahan yang dibebani secara statik cenderung memiliki margin keamanan besar, sehingga peluang optimasi massa rangka tetap perlu disertai pemeriksaan beban dinamis dan sambungan.

3.4 Implikasi desain dan batas penerapan hasil simulasi

Nilai tegangan *von Mises* dan perpindahan yang diperoleh menunjukkan respons model terhadap berat komponen yang dirangkum pada Tabel 2. Karena beban tersebut bersifat statik, hasilnya paling tepat digunakan sebagai pemeriksaan awal rancangan penopang, terutama untuk menelusuri bagian rangka yang menerima tegangan relatif lebih besar. Nilai faktor keamanan yang tinggi tidak dengan sendirinya berarti bahwa kekuatan sambungan, kekakuan saat mesin bergetar, atau ketahanan terhadap beban berulang sudah memenuhi kebutuhan operasional. Oleh sebab itu, interpretasi keselamatan harus tetap dikaitkan dengan ruang lingkup pembebanan dan asumsi model.

Pada mesin yang memadukan penghancuran dan pengadukan, gaya selama operasi dapat berubah akibat putaran penggerak, variasi massa bahan, dan interaksi material dengan unit kerja. Besaran perubahan gaya tersebut tidak diukur pada penelitian ini sehingga tidak dapat ditambahkan sebagai hasil simulasi baru. Dalam tahapan desain berikutnya, kondisi pembebanan aktual dapat diidentifikasi melalui pengukuran atau perhitungan gaya operasi. Informasi itu diperlukan untuk menilai apakah lokasi konsentrasi tegangan yang diamati pada model statik tetap menjadi daerah kritis ketika mesin bekerja. Pemeriksaan ini juga relevan bagi sambungan antara dudukan dan batang penopang.

Dari sisi keandalan hasil numerik, satu konfigurasi mesh belum cukup untuk menunjukkan bahwa nilai puncak tegangan tidak sensitif terhadap ukuran elemen. Uji konvergensi menggunakan beberapa tingkat kerapatan mesh, pemeriksaan tipe kontak, dan evaluasi alternatif kondisi tumpuan akan memperjelas seberapa stabil prediksi perpindahan maupun tegangan. Selain itu, sumber sifat mekanik material perlu disesuaikan dengan spesifikasi baja yang benar-benar dibeli untuk fabrikasi. Jika material aktual atau detail sambungan berbeda dari yang dimasukkan ke dalam model, maka faktor keamanan perlu dihitung kembali berdasarkan kondisi tersebut.

Hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai dasar menentukan prioritas pemeriksaan pada rancangan awal, bukan sebagai dasar tunggal untuk menyatakan mesin telah memenuhi persyaratan keselamatan. Validasi berikutnya sebaiknya membandingkan perpindahan terukur pada titik terpilih dengan prediksi numerik di bawah beban yang terkontrol. Setelah model menunjukkan kesesuaian yang dapat diterima, penelitian dapat diperluas ke pengaruh dinamika kerja, evaluasi sambungan, serta peluang pengurangan massa rangka tanpa mengorbankan kekuatan dan kekakuan yang dibutuhkan.

4. KESIMPULAN

Simulasi elemen hingga pada rangka mesin pengolah pupuk terintegrasi dengan beban statik nominal 449 N menghasilkan tegangan *von Mises* maksimum 15,4 MPa, perpindahan maksimum 0,0673 mm, dan faktor keamanan minimum 16,2 menurut Tabel 3. Dibandingkan dengan tegangan luluh input material sebesar 250 MPa, hasil tersebut menunjukkan bahwa rangka yang dimodelkan belum mencapai kondisi luluh pada kasus pembebanan statik yang dianalisis. Secara numerik, hasil tersebut mendukung kelayakan awal rancangan sebagai penopang dua motor bensin, kotak roda gigi, unit penghancur, dan unit pengaduk dalam konfigurasi beban yang telah ditentukan. Namun, hasil simulasi tidak membuktikan bahwa mesin telah aman pada seluruh keadaan kerja maupun siap dioperasikan tanpa pengujian lebih lanjut. Penelitian dibatasi pada satu konfigurasi beban statik dan belum menunjukkan uji konvergensi mesh, evaluasi beban dinamis, pemodelan detail sambungan las, maupun validasi eksperimental. Tahap pengembangan berikutnya perlu memeriksa ulang data beban dan hasil simulasi, menilai respons terhadap getaran serta siklus pembebanan, dan membandingkan hasil numerik dengan pengukuran rangka hasil fabrikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama kegiatan perancangan dan analisis. Penulis juga berterima kasih kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Nouval Ramadhan : Konseptualisasi, Metodologi, Investigasi, Kurasi Data, Analisis Formal, Visualisasi, Penulisan - Draf Awal.
Wahyu Dwi Lestari : Metodologi, Validasi, Penyediaan Sumber Daya, Supervisi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Bisono, R. M., Hafidhoh, N., & Salim, A. T. A. (2021). Strength Analysis of Frame Structure Loading in Planning Using Solidworks Static Simulation Study. *Biomedical and Mechanical Engineering Journal (BIOMEJ)*, *1*(2), 26-32.

Dzulfiqar, M. F., Prabowo, A. R., Ridwan, R., & Nubli, H. (2021). Assessment on the designed structural frame of the automatic thickness checking machine–Numerical validation in FE method. Procedia Structural Integrity, 33, 59-66.

Eka, B. S., Ahmad, Z., & Andriansyah, W. B. S. (2023). Analysis Static of Chassis Robot Arm as Design Modification Induction Melting Furnace Machine using FEA Method. Journal of Renewable Energy & Mechanics (REM), 6(2), 86-98.

Esye, Y., Asbanu, H., Faturachman, D., & Chan, Y. (2024). Utilization of environmentally friendly energy in organic fertilizer processing machine. Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering), 13(4), 1285-1294.

Ghani, J. A., Ismanizan, M. A., Rahman, H. A., Haron, C. H. C., Juri, A. Z., Kasim, M. S., & Rizal, M. (2024). Machining analysis of S45C carbon steel using finite element method. Jurnal Tribologi, 40, 226-246.

Ibrahim, R. (2024). Perancangan Desain Rangka dan Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pengiris Singkong CV Phonna Raya Machinery Menggunakan Software Solidworks. Nusa Putra University.

Nurhamidin, F., Sadek, R., & Sapsuha, Y. (2019). Pemanfaatan pupuk organik berbasis kotoran ternak sapi untuk peningkatan produksi sayur organik di desa barataku kecamatan galela kabupaten halmahera utara. Jurnal Pengamas, 2(2), 126-132.

Paryanto, & Jayanto, A. D. (2025). Analysis of the frame strength on the paint mixer machine using ANSYS Workbench software. Journal of Applied Mechanical Engineering Innovation, 1(1), 15–25.

Pranugraha, A. F., & Solikin. (2026). Analisa kekuatan rangka pada mesin pencetak bakso kapasitas 5 kg/jam menggunakan ANSYS Workbench. Journal ReSEM, 4(1), 232–237.

Prasetiyo, A. B., & Sekarjati, K. A. (2022). Finite element simulation of power weeder machine frame. Indonesian Journal of Computing, Engineering, and Design (IJoCED), 4(2), 25-34.

Prasetyo, A. F., & Suryadi, U. (2021). Pemanfaatan Limbah Kotoran Ternak Sebagai Pupuk Organik di Kabupaten Jember. Jurnal Pengabdian Masyarakat Peternakan, 6(2).

Rohman, F., Mardiyana, D., Ridha, F., & Damodar, S. K. (2023). Structural analysis of waste separation machine frame using FEA method. International Journal Engineering And Applied Technology (IJEAT), 6(1), 10-17.

Ruitan, J. N. C., Kurnia, M., Sirajuddin, S. N., Rasyid, I., & Rahim, L. (2023). Pemanfaatan sisa bahan organic dalam pembuatan pupuk cair organik untuk mini garden di Lembang La'bo, Kabupaten Toraja Utara. JDISTIRA, 3(1), 3-6.

Sabtu, M. A., Admi, A. E., Salleh, M. M., Osman, S. A., & Osman, S. A. (2024). Finite Element Analysis of Stress Distribution in AL6061 Frame Structures Under Varying Applied Loads. International Journal of Integrated Engineering, 16(2), 259-269.

Suwandy, B., Siregar, A. M., & Siregar, C. A. (2026). Simulasi kekuatan rangka mesin pengupas kulit luar buah pala. Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi, 9(2), 214–221.

Tabayyun, C. (2025). Analisis Frame Meja Dandori Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA). Metrotech (Journal of Mechanical and Electrical Technology), 4(2), 77-87.

Widodo, K., & Nuryosuwito. (2024). Variasi pembebanan rangka mesin pengaduk bumbu tabur menggunakan simulasi Autodesk Inventor. Prosiding SEMNAS INOTEK, 8(2), 674–682.

Wildiy, Y. A., & Istiqlaliyah, H. (2025). Analisis faktor keamanan rangka mesin chopper bertenaga diesel kapasitas produksi 60 kg/menit. Prosiding SEMNAS INOTEK, 9(1), 697–703.

Zaira, J., Ma'a, M., Wijianto, A., & Wicaksono, A. (2026). Design and simulation of ash fertilizer making machine using three-dimensional computer aided design. Research on Engineering Structures and Materials,1, 1-13.