

Studi Numerik Kekuatan Rangka Mesin Briket Arang Menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan Variasi Jenis Material dan Pembebanan

Raihan Aji Yunanto¹, Muhamad Safi'i², Hisyam Ma'mun^{3*}

^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Central Java 50232, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: ¹: muhamadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: <i>Finite Element Method</i> (FEM) Rangka mesin briket arang <i>Structural Steel</i> <i>Stainless Steel</i> analisis kekuatan struktural	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur rangka mesin briket arang dengan membandingkan penggunaan material <i>Structural Steel</i> dan <i>Stainless Steel</i> menggunakan metode <i>Finite Element Method</i> (FEM). Penelitian dilakukan karena kekuatan dan kekakuan rangka berperan penting dalam menjaga kestabilan dan keamanan mesin selama proses operasi. Model rangka dibuat dalam bentuk tiga dimensi menggunakan <i>SolidWorks</i> dan dianalisis secara numerik pada kondisi struktur statik. Analisis dilakukan terhadap parameter <i>total deformation</i>, <i>normal stress</i>, <i>normal elastic strain</i>, dan <i>safety factor</i> dengan kondisi batas berupa <i>fixed support</i> pada kaki rangka. Pembebanan yang diberikan terdiri atas gaya motor sebesar 13,5 N dan variasi beban pengepres sebesar 9,5–36,5 N. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan kenaikan nilai deformasi, tegangan, dan regangan pada kedua material. Pada pembebanan maksimum 36,5 N, nilai <i>total deformation</i> material <i>Structural Steel</i> sebesar 1,17570 mm dan <i>Stainless Steel</i> sebesar 1,21840 mm. Nilai <i>normal stress</i> maksimum yang diperoleh masing-masing sebesar 27,138 MPa dan 27,139 MPa, sedangkan nilai <i>safety factor</i> sebesar 9,21 untuk <i>Structural Steel</i> dan 7,63 untuk <i>Stainless Steel</i>. Hasil validasi antara simulasi numerik dan pengujian aktual menunjukkan nilai error sebesar 1,008–1,015% pada <i>Structural Steel</i> dan 0,997–1,019% pada <i>Stainless Steel</i>, yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan kondisi aktual. Berdasarkan hasil penelitian, <i>Structural Steel</i> memiliki kekakuan struktur dan tingkat keamanan yang lebih baik dibandingkan <i>Stainless Steel</i> sehingga lebih direkomendasikan sebagai material rangka mesin briket arang.
Keywords: <i>Finite Element Method</i> (FEM) charcoal briquette machine frame <i>Structural Steel</i> <i>Stainless Steel</i> structural strength analysis	This study aims to analyze and compare the structural strength of a charcoal briquette machine frame using <i>Structural Steel</i> and <i>Stainless Steel</i> materials through the <i>Finite Element Method</i> (FEM). The research was conducted because the strength and stiffness of the frame play an important role in maintaining the stability and safety of the machine during operation. The frame model was designed in three dimensions using <i>SolidWorks</i> and analyzed numerically under <i>Static Structural</i> conditions. The analysis was carried out based on the parameters of <i>total deformation</i>, <i>normal stress</i>, <i>normal elastic strain</i>, and <i>safety factor</i>, with fixed support boundary conditions applied at the frame legs. The applied loading consisted of a motor force of 13.5 N and variations of pressing loads ranging from 9.5 N to 36.5 N. The simulation results showed that increasing the applied load caused an increase in deformation, stress, and strain values for both materials. Under the maximum load of 36.5 N, the <i>total deformation</i> of <i>Structural Steel</i> was 1.17570 mm, while <i>Stainless Steel</i> reached 1.21840 mm. The maximum normal stress values obtained were 27.138 MPa and 27.139 MPa, respectively, while the safety factor values were 9.21 for <i>Structural Steel</i> and 7.63 for <i>Stainless Steel</i>. Validation results between numerical simulations and experimental testing showed error values ranging from 1.008–1.015% for <i>Structural Steel</i> and 0.997–1.019% for <i>Stainless Steel</i>, indicating a good level of agreement between the simulation results and actual conditions. Based on the results of this study, <i>Structural Steel</i> exhibited better structural stiffness and safety performance than <i>Stainless Steel</i>, making it more suitable for use as a charcoal briquette machine frame material.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang manufaktur menuntut penggunaan mesin produksi yang memiliki struktur kokoh, stabil, serta mampu beroperasi secara aman dan berkelanjutan dalam jangka waktu yang lama [1]. Salah satu komponen utama pada mesin adalah rangka, yang berfungsi sebagai struktur penopang seluruh komponen mesin serta menerima berbagai jenis pembebanan selama proses operasi berlangsung [2]. Kekuatan struktur rangka memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kestabilan, kinerja, dan masa pakai suatu mesin [3]. Struktur rangka yang mengalami deformasi berlebih atau menerima tegangan melebihi batas kekuatan material berpotensi menyebabkan penurunan kinerja hingga terjadinya kegagalan konstruksi. Oleh karena itu, analisis kekuatan struktur merupakan salah satu tahapan penting dalam proses perancangan mesin [4]. Seiring dengan perkembangan teknologi rekayasa, metode simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) semakin banyak diterapkan dalam analisis perilaku struktur karena mampu memberikan hasil analisis yang lebih rinci, efektif, dan efisien dibandingkan metode pengujian konvensional [5].

Mesin briket arang merupakan perangkat yang digunakan untuk memadatkan bahan baku arang menjadi bentuk briket tertentu sehingga memiliki nilai guna serta nilai ekonomis yang lebih tinggi sebagai sumber energi alternatif [6]. Selama proses pengoperasian berlangsung, rangka mesin menerima berbagai pembebanan yang berasal dari motor penggerak, sistem penekan, serta getaran mekanis yang terjadi secara kontinu [7]. Kondisi tersebut menuntut rangka mesin memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai agar mampu menopang seluruh komponen secara aman serta menjaga kestabilan mesin selama beroperasi. Selain desain konstruksi, pemilihan material rangka merupakan faktor penting yang mempengaruhi kemampuan struktur dalam menerima pembebanan, karena setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda.

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Structural Steel* dan *Stainless Steel*. *Structural Steel* merupakan material yang umum diaplikasikan pada konstruksi rangka mesin karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, mudah difabrikasi, serta memiliki biaya yang relatif ekonomis. Di sisi lain, *Stainless Steel* memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi sehingga lebih sesuai digunakan pada lingkungan yang lembab dan bersifat korosif. Perbedaan karakteristik mekanik dari kedua material tersebut berpengaruh terhadap respons struktur dalam menerima pembebanan, khususnya pada distribusi tegangan, regangan, dan deformasi yang terjadi pada rangka mesin [8].

Berbagai penelitian terdahulu telah menerapkan metode *Finite Element Method* (FEM) dalam menganalisis kekuatan struktur pada konstruksi mesin maupun komponen mekanik [9]. Pada rangka mesin pencacah nilam, hasil analisis menunjukkan deformasi maksimum sebesar 0,151 mm, tegangan *von Mises* sebesar 23,16 MPa, dan *Safety factor* minimum 8,94 pada pembebanan 1000 N, sehingga struktur dinyatakan aman. Hasil berbeda diperoleh pada rangka mesin pres batako dengan variasi beban 700–1500 kg, yaitu deformasi maksimum 0,25–0,54 mm, tegangan maksimum 70,03–150,9 MPa, serta *Safety factor* berkisar 2,96–1,37 [10]. Sementara itu, rangka mesin penggiling padi berbahan ASTM A500 Grade B menunjukkan deformasi maksimum yang jauh lebih kecil, yakni $4,3967 \times 10^{-7}$ m, dengan tegangan normal maksimum 15,550 kPa dan *Safety factor* minimum 15, yang mengindikasikan kekakuan dan ketahanan struktur yang baik [11]. Pada rangka penyangga mesin injeksi molding plastik vertikal pneumatik, seluruh variasi desain yang diuji menghasilkan deformasi kurang dari 1 mm dengan *Safety factor* minimum 4,5 [9]. Adapun analisis rangka *belt conveyor* dengan variasi pembebanan 100–500 kg memperoleh *Safety factor* sebesar 3,70 pada beban 100 kg dan 2,19 pada beban 500 kg, keduanya masih berada di atas batas aman minimum [12]. Perbandingan material juga dilakukan pada rangka motor trail, di mana pipa besi Sch 40 terbukti mampu menahan distribusi tegangan sekitar 12% lebih baik serta menghasilkan deformasi sekitar 90% lebih rendah dibandingkan Aluminium 6061 [7]. Pada kasus lain, simulasi *screw press* mesin pencetak briket berbahan Aluminium 6082-T6 menghasilkan tegangan maksimum 4,9–5,26 MPa, regangan maksimum $6,99 \times 10^{-5}$ hingga $7,47 \times 10^{-5}$, dan *Safety factor* sekitar 15, sehingga struktur dinilai aman [13]. Hasil-hasil penelitian tersebut secara konsisten menunjukkan bahwa bentuk geometri, jenis material, dan kondisi pembebanan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons struktur suatu konstruksi, serta membuktikan bahwa metode FEM mampu menghasilkan prediksi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi struktur secara rinci.

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah berhasil menerapkan metode *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis kekuatan struktur pada berbagai jenis rangka mesin, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis material atau satu kondisi pembebanan tertentu [14]. Selain itu, pembahasan umumnya hanya menitik beratkan pada nilai deformasi atau tegangan tanpa mengevaluasi secara komprehensif hubungan antara deformasi, tegangan, regangan elastis, dan *safety factor* pada rangka mesin briket arang [15]. Penelitian terdahulu juga masih terbatas dalam melakukan validasi hasil simulasi melalui pengujian eksperimen sehingga tingkat kesesuaian antara model numerik dan kondisi aktual belum banyak dibahas. Kondisi tersebut menunjukkan masih adanya kebutuhan penelitian yang mampu membandingkan performa dua material berbeda pada berbagai variasi pembebanan sekaligus memverifikasi hasil simulasi melalui pengujian eksperimental. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif kekuatan rangka mesin briket arang menggunakan dua material yang banyak digunakan di industri, yaitu *Structural Steel* dan *Stainless Steel*, pada beberapa variasi pembebanan dengan pendekatan *Finite Element Method* (FEM). Selain membandingkan

parameter *deformasi*, tegangan, regangan *elastis*, dan *safety factor*, penelitian ini juga melakukan validasi hasil simulasi terhadap pengujian eksperimen sehingga mampu memberikan evaluasi yang lebih komprehensif mengenai akurasi model numerik sekaligus menghasilkan rekomendasi material yang paling sesuai untuk aplikasi rangka mesin briket arang.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan kekuatan struktur rangka mesin briket arang yang menggunakan material *Structural Steel* dan *Stainless Steel* dengan menerapkan metode *Finite Element Method* (FEM) [16]. Analisis dilakukan berdasarkan parameter *total deformation*, *normal stress*, dan *normal strain* untuk mengetahui karakteristik respons struktur dari masing-masing material terhadap pembebanan yang diberikan [17]. Selain itu, hasil simulasi deformasi dibandingkan dengan hasil pengujian aktual guna mengevaluasi tingkat kesesuaian antara analisis numerik dan kondisi nyata di lapangan sehingga dapat diperoleh material yang lebih efektif dan aman untuk digunakan pada konstruksi rangka mesin briket arang [18]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai bahan acuan dalam bidang industri manufaktur, khususnya pada perancangan struktur rangka mesin produksi berbasis simulasi numerik. Penerapan metode *Finite Element Method* (FEM) mampu mendukung proses analisis kekuatan struktur secara lebih efisien sebelum dilaksanakan tahap fabrikasi. Selain itu, hasil perbandingan antara material *Structural Steel* dan *Stainless Steel* dapat dijadikan dasar dalam menentukan material rangka mesin yang memiliki tingkat keamanan, efisiensi biaya, dan kesesuaian terhadap kondisi operasional industri. Dengan demikian, pemilihan material yang tepat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi proses produksi, keselamatan kerja, serta ketahanan dan umur pakai mesin.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model Fisik Rangka

Rangka mesin dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* dengan konstruksi utama berupa profil hollow berbentuk persegi. Geometri rangka ditampilkan tampak depan, tampak samping, tampak atas, serta tampilan isometri rangka untuk memperjelas bentuk dan susunan struktur secara keseluruhan.

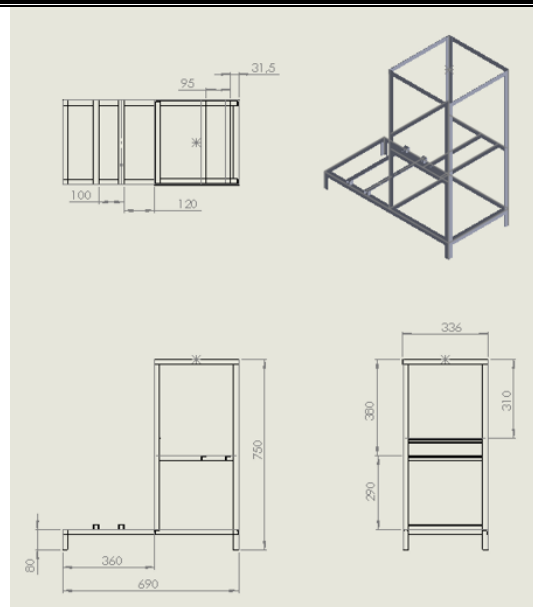
Dimensi utama rangka memiliki tinggi sebesar 750 mm, panjang bagian bawah sebesar 690 mm, dan lebar rangka sebesar 336 mm. Pada bagian bawah rangka terdapat dudukan mesin dengan panjang 360 mm dan tinggi kaki bawah sebesar 86 mm. Selain itu, terdapat beberapa batang penyangga horizontal dan vertikal yang berfungsi untuk meningkatkan kekakuan struktur serta menopang sistem pengepres dan motor penggerak mesin.



Gambar 1. Model 3D Rangka Mesin Briket Arang

2.2 Dimensi Rangka

Desain rangka mesin penggiling dirancang sebagai struktur penopang utama yang berfungsi untuk menopang seluruh komponen mesin. Perancangan rangka mempertimbangkan aspek kekuatan dan kestabilan konstruksi agar mampu mendukung kinerja mesin selama proses pengoperasian. Selain sebagai penopang, rangka juga dirancang untuk memudahkan pemasangan komponen, perakitan, serta perawatan mesin. Detail rancangan rangka mesin penggiling yang meliputi tampak atas, tampak depan, tampak samping, dan tampak isometrik ditunjukkan pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Desain Dan Dimensi Rangka Mesin Briket Arang

2.3 Bahan dan Sifat Mekanik

Material ditentukan berdasarkan sifat mekanik yang digunakan sebagai parameter masukan pada analisis *Finite Element Method* (FEM). Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari *Structural Steel* dan *Stainless Steel* yang dipilih untuk membandingkan pengaruh sifat mekanik terhadap kinerja rangka mesin briket arang. Kedua material tersebut dipilih karena merupakan material yang umum digunakan pada konstruksi rangka mesin. *Structural Steel* memiliki modulus elastisitas dan kekuatan luluh yang tinggi sehingga mampu memberikan kekakuan struktur yang lebih baik, sedangkan *Stainless Steel* memiliki ketahanan korosi yang lebih baik sehingga sesuai digunakan pada lingkungan operasi yang memiliki tingkat kelembapan tinggi. Dengan karakteristik mekanik yang berbeda, kedua material diperkirakan memberikan respons struktur yang berbeda ketika menerima pembebanan yang sama.

Nilai sifat mekanik yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada data material standar yang banyak digunakan dalam analisis struktur menggunakan *Finite Element Method* (FEM), sehingga mampu merepresentasikan karakteristik mekanik kedua material selama proses simulasi. Material *Structural Steel* dan *Stainless Steel* dipilih karena keduanya merupakan material yang umum digunakan sebagai konstruksi rangka mesin serta memiliki karakteristik mekanik yang berbeda. *Structural Steel* memiliki modulus elastisitas dan kekuatan luluh yang relatif tinggi sehingga mampu memberikan kekakuan struktur yang lebih baik, sedangkan *Stainless Steel* memiliki ketahanan korosi yang lebih baik sehingga banyak diaplikasikan pada lingkungan kerja yang memerlukan ketahanan terhadap oksidasi. Pemilihan kedua material tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan sifat mekanik terhadap respons struktur rangka mesin briket arang menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM). Nilai sifat mekanik yang digunakan mengacu pada data material standar yang umum digunakan dalam analisis struktur sehingga dapat merepresentasikan karakteristik mekanik masing-masing material selama proses simulasi. Perbandingan kedua material dilakukan berdasarkan beberapa parameter sifat mekanik utama yang berkaitan dengan kekuatan struktur, yaitu densitas (*density*), modulus elastisitas (*Young's modulus*), rasio Poisson (*Poisson's ratio*), tegangan luluh (*yield strength*), dan tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*). Nilai masing-masing parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

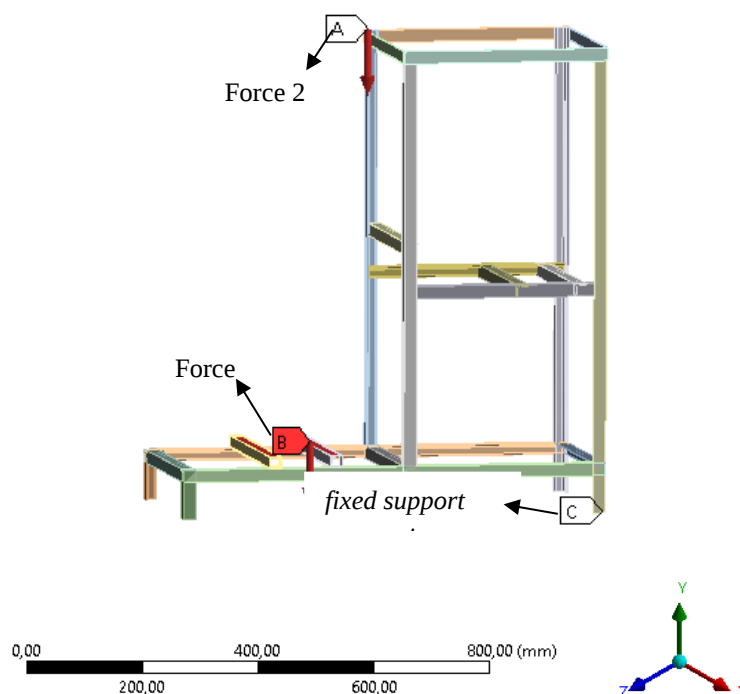
Tabel 1. Data Sifat Mekanik Material

Parameter	<i>Structural Steel</i>	<i>Stainless Steel</i>	Satuan
Density	7,85e-06	7,75e-06	kg/mm ³
Young's Modulus	2e+05	1,93e+05	MPa
Poisson's Ratio	0,3	0,31	-
Tensile Yield Strength	250,00	207,00	MPa
Ultimate Tensile Strength	460,00	586,00	MPa

2.4 Studi Numerik

2.4.1 Domain Komputasi

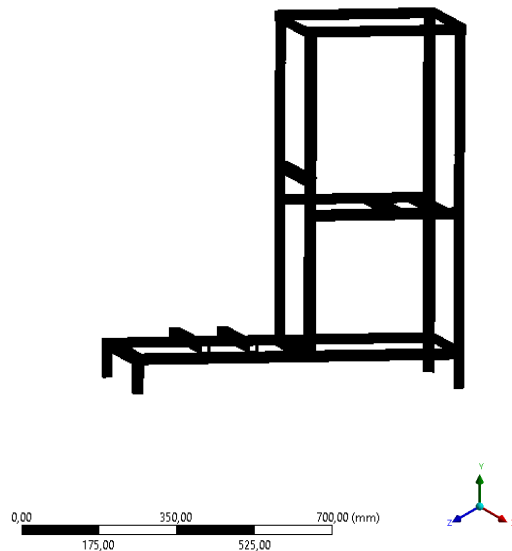
Domain komputasi ditetapkan pada seluruh struktur rangka mesin briket arang yang dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan *SolidWorks* dan dianalisis menggunakan FEM pada modul *Static Structural*. Geometri rangka memiliki dimensi utama tinggi 750 mm, panjang 690 mm, dan lebar 336 mm. Domain analisis mencakup seluruh komponen rangka yang berfungsi sebagai penopang sistem pengepres dan motor penggerak. Penentuan lokasi kondisi batas (*fixed support*) diterapkan pada keempat kaki rangka untuk merepresentasikan kondisi aktual ketika rangka terpasang secara kaku pada lantai sehingga perpindahan translasi maupun rotasi pada titik tersebut dianggap bernilai nol. Asumsi ini umum digunakan dalam analisis statik struktur karena mampu menggambarkan kondisi operasi mesin ketika bekerja tanpa mengalami perpindahan pada bagian pondasi. Besarnya pembebanan berasal dari estimasi beban statik yang bekerja pada rangka, yaitu kombinasi berat motor penggerak sebesar 13,5 N dan beban sistem pengepres yang divariasikan antara 9,5–36,5 N sesuai rentang beban kerja yang diterima rangka selama proses pengepresan briket arang. Analisis dilakukan untuk memperoleh distribusi *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor* pada struktur rangka akibat pembebanan yang diberikan.



Gambar 3. Posisi *Fixed support* dan *Force*

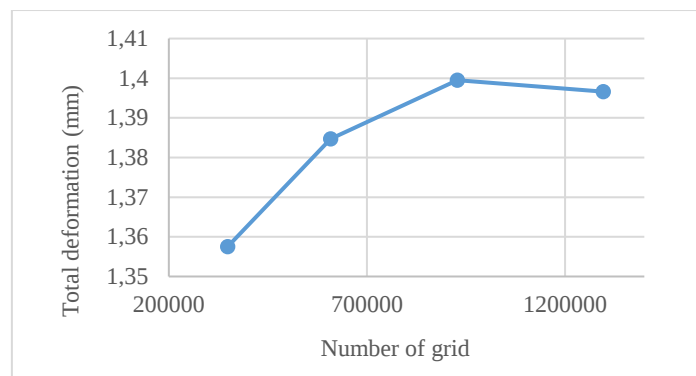
2.4.2 Meshing

Proses meshing dilakukan menggunakan metode *Automatic Method* dengan ukuran elemen (*body sizing*) sebesar 1,25 mm dan pengaturan smoothing kategori High. Ukuran mesh tersebut dipilih sebagai kompromi antara tingkat ketelitian hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Semakin kecil ukuran elemen, semakin tinggi ketelitian distribusi tegangan dan deformasi yang diperoleh, namun kebutuhan waktu komputasi juga meningkat. Oleh karena itu, ukuran mesh selanjutnya dievaluasi melalui uji *grid independence* untuk memastikan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen dan tidak lagi dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan jumlah elemen. Proses meshing model rangka ditunjukkan pada Gambar 3.

**Gambar 4.** Proses Meshing

2.4.3 Uji Grid Independent

Uji grid dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah grid terhadap hasil simulasi dan memastikan bahwa hasil yang diperoleh telah mencapai kondisi konvergen. Pada pengujian ini, jumlah grid divariasikan dari 348.226 hingga 1.296.258 dengan beban tetap sebesar 51,5 N, sedangkan parameter yang diamati adalah total deformasi rata-rata.

**Gambar 5.** Grafik Total Deformasi

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai total deformasi cenderung konvergen seiring peningkatan jumlah grid. Nilai deformasi berubah dari 1,3575 mm pada grid 348.226 menjadi 1,3995 mm pada grid 927.924, kemudian hanya berubah menjadi 1,3966 mm pada grid 1.296.258. Perubahan yang sangat kecil pada tahap akhir menunjukkan bahwa hasil simulasi telah stabil. Oleh karena itu, grid 1.296.258 dipilih sebagai mesh penelitian karena memberikan hasil yang paling konvergen dan mampu meningkatkan keandalan analisis numerik. Nilai deformasi berubah dari 1,3575 mm pada grid 348.226 menjadi 1,3995 mm pada grid 927.924, kemudian hanya berubah menjadi 1,3966 mm pada grid 1.296.258. Perubahan yang sangat kecil pada tahap akhir menunjukkan bahwa hasil simulasi telah stabil. Oleh karena itu, grid 1.296.258 dipilih sebagai mesh penelitian karena memberikan hasil yang paling konvergen dan mampu meningkatkan keandalan analisis numerik.

2.4.4 Set Up Simulasi

Set up simulasi dilakukan menggunakan modul *Static Structural* dengan metode *Finite Element Method (FEM)*. Pada tahap *Engineering Data*, material yang digunakan didefinisikan sebagai *Structural Steel* dan *Stainless Steel* sesuai dengan sifat mekaniknya. Selanjutnya dilakukan proses *meshing* untuk membagi geometri rangka menjadi elemen-elemen hingga yang digunakan dalam perhitungan numerik. Setelah mesh terbentuk, kondisi batas (*boundary condition*)

ditetapkan dengan memberikan *Fixed support* pada bagian kaki rangka dan pembebanan berupa *Force* pada kedudukan komponen mesin dengan variasi pembebanan sebesar 9,5 N hingga 36,5 N. Parameter hasil yang dianalisis meliputi *Total deformation*, *Normal stress*, *Normal elastic strain*, dan *Safety factor*. Setelah seluruh pengaturan selesai, simulasi dijalankan menggunakan solver berbasis *Finite Element Method* (FEM) hingga diperoleh hasil yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur rangka terhadap pembebanan yang diberikan. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa kedua material bersifat homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linier, sedangkan pengaruh sambungan las, tegangan sisa, deformasi akibat proses fabrikasi, getaran dinamis, serta pengaruh temperatur tidak dimasukkan ke dalam model. Asumsi tersebut digunakan untuk menyederhanakan proses analisis sehingga fokus penelitian diarahkan pada evaluasi respons struktur akibat pembebanan statik menggunakan metode *Finite Element Method*.

2.4.5 Validasi

Validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dan hasil pengujian eksperimental pada rangka mesin briket arang. Parameter yang digunakan dalam proses validasi adalah *total deformation* karena menunjukkan besarnya perpindahan struktur akibat pembebanan yang diberikan. Perbandingan dilakukan pada rentang pembebanan 9,5–36,5 N dengan membandingkan nilai deformasi hasil simulasi dan hasil pengujian eksperimental. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai deformasi pada kedua metode mengalami peningkatan seiring bertambahnya pembebanan. Pada material *Structural Steel*, nilai deformasi hasil eksperimen berada pada rentang 0,70044–1,05813 mm, sedangkan hasil simulasi berada pada rentang 0,77827–1,17570 mm. Sementara itu, pada material *Stainless Steel*, deformasi hasil eksperimen berkisar antara 0,79842–1,20618 mm dan hasil simulasi berkisar antara 0,80656–1,21840 mm. Nilai *error* pada material *Structural Steel* berada pada rentang 1,008–1,015%, sedangkan pada material *Stainless Steel* berada pada rentang 0,997–1,019%. Nilai *error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil simulasi numerik memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap hasil pengujian eksperimental, sehingga model simulasi yang digunakan dapat merepresentasikan perilaku struktur rangka mesin briket arang dengan baik pada kondisi pembebanan yang ditinjau.

Tabel 2 . Data Validasi Structural Steel

Beban (N)	Total Deformasi Eksperimen (mm)	Total Deformasi Numerik (mm)	Error (%)
9,5	0,70044	0,77827	1,01499124
12,5	0,74016	0,8224	1,00960476
15,5	0,77988	0,86653	1,01065442
18,5	0,8206	0,91067	1,01495252
21,5	0,85935	0,95483	1,01455715
24,5	0,89908	0,99898	1,00807879
27,5	0,93879	1,0431	1,0100032
30,5	0,97857	1,0873	1,0145116
33,5	1,01835	1,1315	1,01325715
36,5	1,05813	1,1757	1,01036136

Tabel 3. Data Validasi Stainlees Steel

Beban (N)	Total Deformasi Eksperimen (mm)	Total Deformasi Numerik (mm)	Error (%)
9,5	0,79842	0,80656	1,01951354
12,5	0,84371	0,85229	1,0169371

15,5	0,88904	0,89803	1,0112031
18,5	0,93426	0,94378	1,01898829
21,5	0,97963	0,98954	1,01160642
24,5	1,02488	1,03530	1,01670439
27,5	1,07021	1,08110	1,0175573
30,5	1,11546	1,12680	1,01662095
33,5	1,16102	1,17260	0,99739884
36,5	1,20618	1,21840	1,01311579

Berdasarkan hasil validasi yang dilakukan, nilai *total deformation* hasil simulasi numerik dan pengujian aktual pada kedua material menunjukkan pola peningkatan yang serupa seiring dengan bertambahnya pembebanan. Pada material *Structural Steel*, nilai deformasi hasil simulasi meningkat dari 0,77827 mm pada pembebanan 9,5 N menjadi 1,17570 mm pada pembebanan 36,5 N, sedangkan hasil pengujian aktual meningkat dari 0,70044 mm menjadi 1,05813 mm. Pada material *Stainless Steel*, deformasi hasil simulasi mengalami peningkatan dari 0,80656 mm menjadi 1,21840 mm, sementara hasil pengujian aktual meningkat dari 0,79842 mm menjadi 1,20618 mm pada rentang pembebanan yang sama. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai kesalahan relatif (error) berada pada kisaran 1,008% hingga 1,015% untuk *Structural Steel* dan 0,997% hingga 1,019% untuk *Stainless Steel*.

2.4.6 Reduksi Data Numerik

Data hasil simulasi numerik dan pengujian aktual dianalisis secara komparatif untuk mengetahui karakteristik kekuatan struktur rangka mesin briket arang pada material *Structural Steel* dan *Stainless Steel*. Analisis dilakukan berdasarkan parameter *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor* pada setiap variasi pembebanan yang diberikan. Hasil simulasi digunakan untuk mengetahui respons struktur terhadap peningkatan pembebanan, meliputi tingkat deformasi, distribusi tegangan, regangan elastis, serta tingkat keamanan struktur pada kedua material penelitian.

Tegangan normal dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Regangan normal dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Perhitungan *safety factor* dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

Tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan hasil pengujian aktual dihitung menggunakan persamaan *error* sebagai berikut:

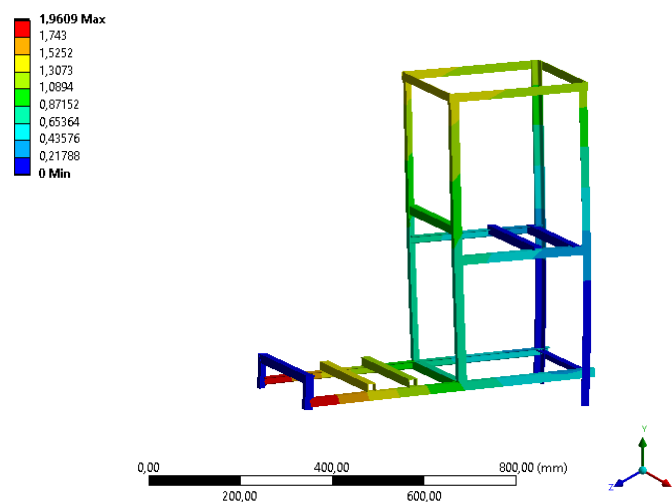
$$Error(\%) = \left| \frac{X_n - X_a}{X_a} \right| \times 100\% \quad (4)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Jenis Material

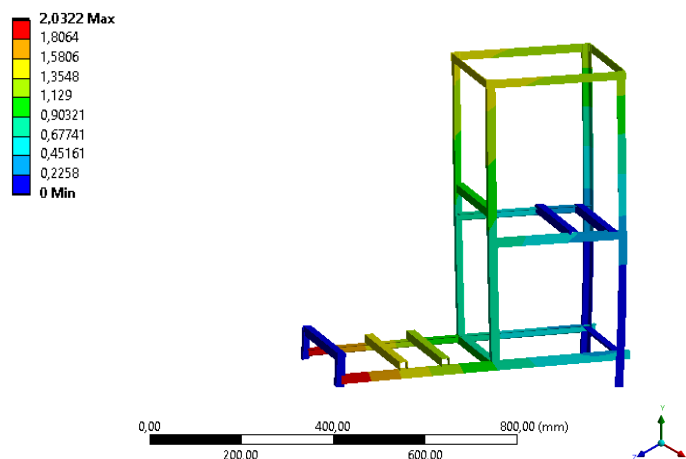
Pengujian material dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan material *Structural Steel* dan *Stainless Steel* terhadap kekuatan struktur rangka mesin briket arang. Perbandingan dilakukan berdasarkan parameter *total deformation* pada kondisi pembebanan yang sama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jenis material memberikan pengaruh yang signifikan terhadap deformasi dan regangan yang terjadi pada rangka. Material *Structural Steel* memiliki modulus elastisitas sebesar 200.000 MPa, sedangkan *Stainless Steel* sebesar 193.000 MPa. Perbedaan nilai modulus elastisitas tersebut menyebabkan *Structural Steel* memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan *Stainless Steel*.

Pada pembebanan maksimum sebesar 36,5 N, nilai *total deformation* pada *Structural Steel* mencapai 1,17570 mm, sedangkan pada *Stainless Steel* sebesar 1,21840 mm. Nilai deformasi yang lebih rendah menunjukkan bahwa *Structural Steel* lebih mampu mempertahankan bentuk struktur ketika menerima beban kerja. Dengan demikian, *Structural Steel* memiliki karakteristik kekakuan yang lebih baik dibandingkan *Stainless Steel*. Kontur distribusi *total deformation* material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan kontur distribusi *total deformation* material *Stainless Steel* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kontur *Total deformation* Pada Material *Structural Steel*

Berdasarkan Gambar 6, distribusi *total deformation* pada material *Structural Steel* menunjukkan bahwa deformasi maksimum terjadi pada bagian rangka yang menerima beban secara langsung, sedangkan area yang berdekatan dengan *fixed support* mengalami deformasi yang relatif kecil. Nilai *total deformation* maksimum yang diperoleh sebesar 1,17570 mm. Nilai deformasi yang rendah tersebut menunjukkan bahwa *Structural Steel* memiliki kekakuan yang baik sehingga mampu mempertahankan bentuk struktur saat menerima pembebanan. Distribusi deformasi yang terjadi masih berada dalam batas yang aman dan tidak menunjukkan adanya perubahan bentuk yang berlebihan pada rangka mesin briket arang.



Gambar 7. Kontur *Total deformation* Pada Material *Stainless Steel*

Berdasarkan Gambar 7, distribusi *total deformation* pada material *Stainless Steel* memperlihatkan pola yang serupa dengan *Structural Steel*, yaitu deformasi maksimum terjadi pada bagian rangka yang menerima pembebanan terbesar. Namun, nilai *total deformation* maksimum yang dihasilkan mencapai 1,21840 mm, lebih tinggi dibandingkan *Structural Steel*. Nilai deformasi yang lebih besar menunjukkan bahwa *Stainless Steel* mengalami perubahan bentuk yang lebih tinggi akibat pengaruh beban kerja. Hal ini disebabkan oleh modulus elastisitas *Stainless Steel* yang lebih rendah sehingga tingkat kekakuannya juga lebih rendah dibandingkan *Structural Steel*.

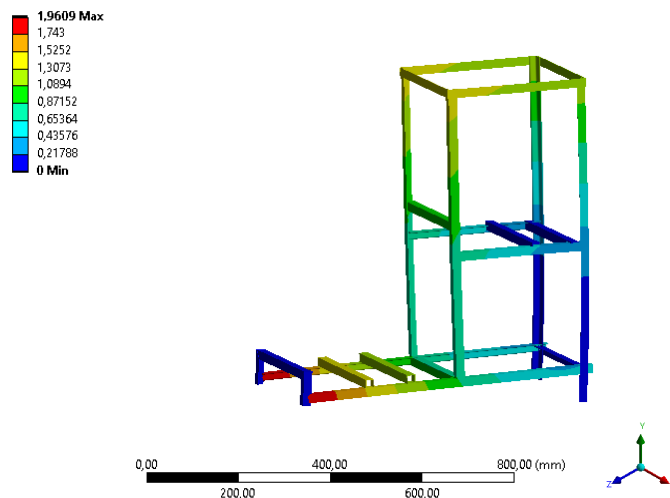
Selisih deformasi sebesar 0,04270 mm menunjukkan bahwa penggunaan *Structural Steel* mampu meningkatkan kekakuan struktur rangka dibandingkan *Stainless Steel*. Meskipun perbedaannya relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan material tetap memberikan pengaruh terhadap respons struktur yang dihasilkan. Deformasi yang lebih rendah menunjukkan bahwa struktur memiliki kestabilan yang lebih baik dalam menopang komponen mesin dan menerima beban kerja selama proses operasi.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa material *Structural Steel* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan *Stainless Steel* dalam menahan deformasi struktur. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *total deformation* yang lebih rendah sehingga *Structural Steel* dinilai lebih sesuai digunakan sebagai material rangka mesin briket arang.

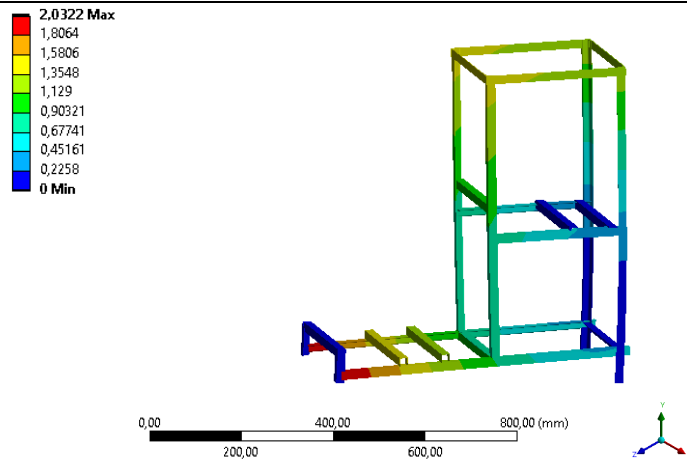
3.2 Pengaruh Pembebanan

Pada penelitian ini, simulasi numerik dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) pada struktur rangka mesin briket arang dengan material *Structural Steel* dan *Stainless Steel*. Variasi pembebanan diberikan mulai dari 9,5 N hingga 36,5 N untuk mengetahui pengaruh pembebanan terhadap respons struktur. Parameter yang dianalisis meliputi *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan nilai deformasi pada kedua material mengalami peningkatan secara bertahap. Deformasi maksimum terjadi pada bagian rangka yang menerima pembebanan langsung, sedangkan deformasi minimum terjadi pada area *fixed support*. Kontur distribusi *total deformation* material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 8, sedangkan kontur distribusi *total deformation* material *Stainless Steel* ditunjukkan pada Gambar 9.

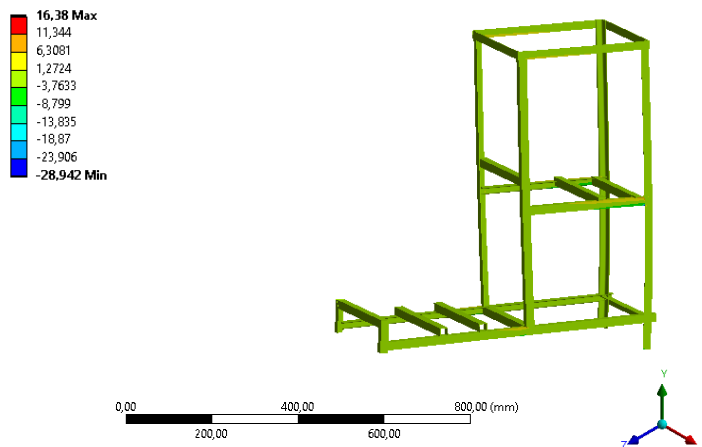


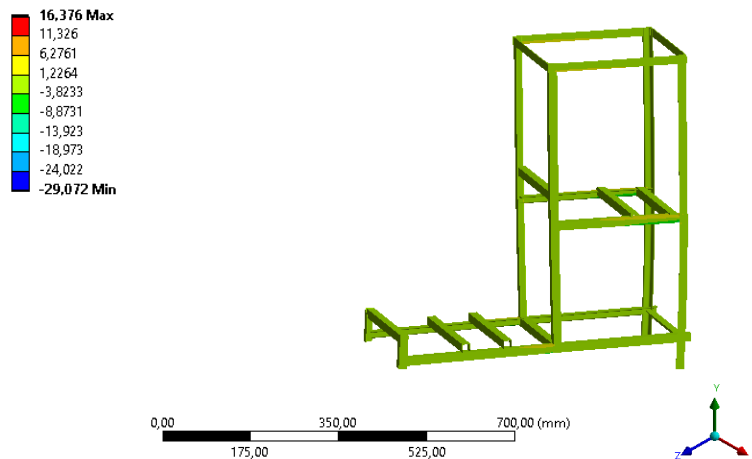
Gambar 8. Kontur *Total deformation* Pada Material *Structural Steel*

**Gambar 9.** Kontur *Total deformation* Pada Material *Stainless Steel*

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, seiring dengan bertambahnya pembebanan, nilai *total deformation* pada kedua material mengalami peningkatan secara bertahap. Pada material *Structural Steel*, nilai deformasi maksimum meningkat dari 0,77827 mm pada pembebanan 9,5 N menjadi 1,17570 mm pada pembebanan 36,5 N. Sementara itu, material *Stainless Steel* mengalami peningkatan deformasi maksimum dari 0,80656 mm menjadi 1,21840 mm pada kondisi pembebanan yang sama.

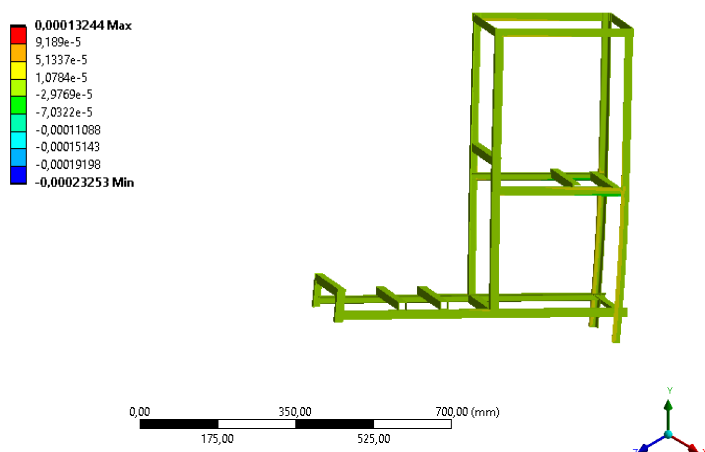
Respons struktur akibat pembebanan tidak hanya ditunjukkan oleh besarnya deformasi yang terjadi, tetapi juga oleh distribusi tegangan pada rangka. Analisis *normal stress* dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan yang timbul pada kedua material selama menerima pembebanan. Tegangan yang terjadi pada struktur kemudian divisualisasikan dalam bentuk kontur distribusi *normal stress*. Kontur distribusi *normal stress* material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 10, sedangkan material *Stainless Steel* ditunjukkan pada Gambar 11.

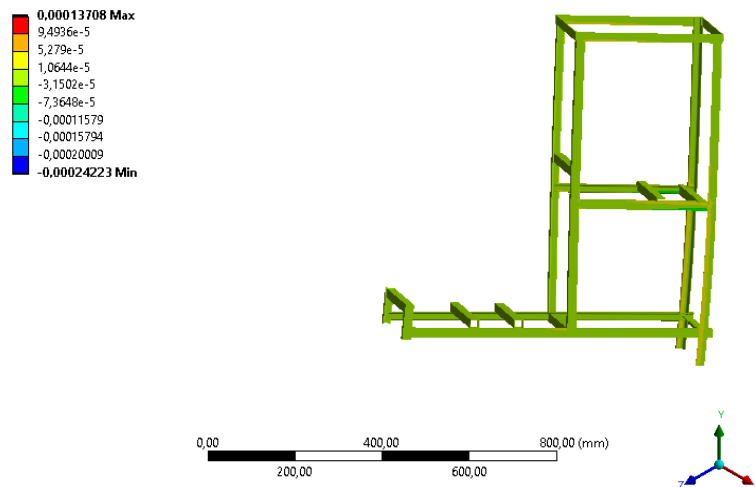
**Gambar 10.** Kontur *Normal Stress* Pada Material *Structural Steel*

**Gambar 11.** Kontur *Normal Stress* Pada Material *Stainless Steel*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan dari 9,5 N hingga 36,5 N menyebabkan nilai *normal stress* pada kedua material meningkat secara bertahap. Tegangan maksimum terkonsentrasi pada area sambungan rangka dan titik pembebanan karena bagian tersebut menerima distribusi gaya terbesar. Pada pembebanan maksimum 36,5 N, material *Structural Steel* menghasilkan *normal stress* sebesar 27,138 MPa, sedangkan *Stainless Steel* sebesar 27,139 MPa. Nilai yang hampir sama tersebut menunjukkan bahwa distribusi tegangan lebih dipengaruhi oleh geometri rangka dan kondisi pembebanan daripada jenis material yang digunakan.

Seiring dengan meningkatnya pembebanan yang diberikan, nilai *normal elastic strain* pada kedua material juga mengalami peningkatan. Regangan elastis maksimum terdistribusi pada area yang menerima konsentrasi tegangan terbesar, terutama pada bagian sambungan dan titik pembebanan. Kontur distribusi *normal elastic strain* pada material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 12, sedangkan kontur distribusi *normal elastic strain* pada material *Stainless Steel* ditunjukkan pada Gambar 13.

**Gambar 12.** Kontur *Normal elastic strain* Material *Structural Steel*

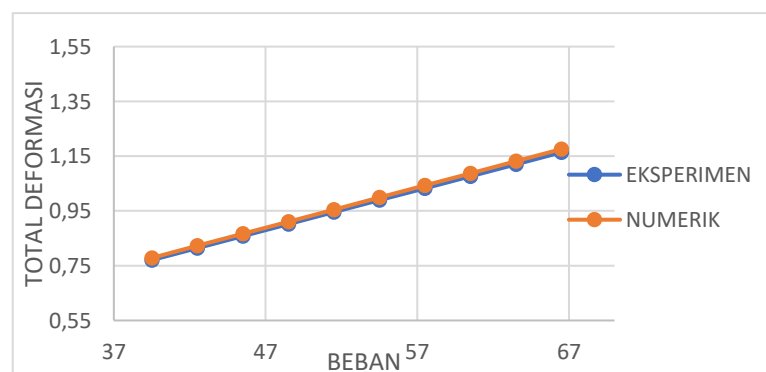
**Gambar 13.** Kontur *Normal elastic strain* Material *Stainles Steel*

Peningkatan pembebanan dari 9,5 N hingga 36,5 N menyebabkan nilai *normal elastic strain* pada kedua material meningkat secara bertahap. Nilai regangan maksimum terjadi pada area sambungan rangka dan titik pembebanan yang mengalami konsentrasi tegangan tertinggi. Berdasarkan hasil simulasi, material *Structural Steel* menghasilkan nilai *normal elastic strain* maksimum sebesar $7,978 \times 10^{-5}$, sedangkan material *Stainless Steel* menghasilkan nilai regangan yang lebih tinggi pada kondisi pembebanan yang sama. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa *Structural Steel* memiliki kekakuan yang lebih baik sehingga mampu menahan perubahan bentuk lebih efektif dibandingkan *Stainless Steel*. Nilai regangan yang diperoleh pada kedua material masih berada dalam batas elastis, sehingga struktur rangka masih mampu kembali ke kondisi semula setelah pembebanan dilepaskan. Tingkat keamanan struktur terhadap pembebanan yang diberikan kemudian dievaluasi melalui perhitungan *safety factor* yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Safety factor*

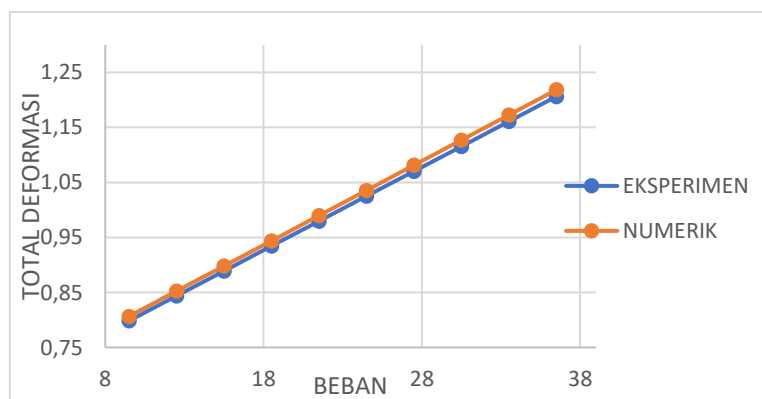
Material	Yield Strength (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Safety factor
<i>Stainless Steel</i>	207	27,139	7,63
<i>Structural Steel</i>	250	27,138	9,21

Berdasarkan Tabel 4, material *Structural Steel* memiliki nilai *safety factor* sebesar 9,21, sedangkan *Stainless Steel* memiliki nilai *safety factor* sebesar 7,63. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kedua material masih berada pada kondisi aman karena tegangan maksimum yang terjadi masih jauh di bawah batas luluh masing-masing material. Nilai *safety factor* yang lebih tinggi pada *Structural Steel* menunjukkan bahwa material tersebut memiliki cadangan kekuatan



yang lebih besar dibandingkan *Stainless Steel*, sehingga lebih mampu menahan pembebanan kerja yang diberikan pada rangka mesin briket arang.

Gambar 14. Grafik Validasi Deformasi Material *Structural Steel*



Gambar 15. Grafik Validasi Deformasi Material *Stainless Steel*

Berdasarkan grafik hasil validasi, deformasi maksimum hasil simulasi numerik dan pengujian eksperimen pada kedua material menunjukkan kecenderungan peningkatan yang hampir serupa seiring bertambahnya pembebanan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa metode *Finite Element Method* (FEM) mampu menggambarkan perilaku struktural rangka mesin briket arang dengan cukup baik. Perbedaan yang terjadi antara hasil simulasi dan pengujian aktual dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti idealisasi pada model simulasi, kondisi pembebanan saat pengujian berlangsung, kualitas mesh yang digunakan, serta tingkat ketelitian pembacaan dial indicator pada proses eksperimen. Meskipun demikian, hasil validasi menunjukkan bahwa metode FEM dapat digunakan sebagai pendekatan numerik yang efektif dalam menganalisis kekuatan struktur rangka mesin briket arang.

3.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, yaitu hanya mengevaluasi dua jenis material, yaitu *Structural Steel* dan *Stainless Steel*, dengan pembebanan statik pada model rangka mesin briket arang. Oleh karena itu, hasil penelitian belum dapat menggambarkan respons struktur terhadap penggunaan material lain maupun kondisi pembebanan yang lebih kompleks, seperti pembebanan dinamis, beban kelelahan (fatigue), dan getaran. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas variasi material, mempertimbangkan kondisi pembebanan yang lebih representatif, serta mengevaluasi pengaruh faktor manufaktur dan sambungan terhadap kinerja struktur rangka mesin.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis kekuatan rangka mesin briket arang menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) pada material *Structural Steel* dan *Stainless Steel*, dapat disimpulkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan kenaikan nilai *total deformation*, *normal stress*, dan *normal strain* pada kedua material secara bertahap. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa besarnya beban yang diberikan berpengaruh terhadap respons struktural rangka mesin.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa material *Structural Steel* memiliki tingkat kekakuan yang lebih baik dibandingkan *Stainless Steel*, yang ditunjukkan oleh nilai *total deformation* yang lebih rendah pada seluruh variasi pembebanan. Pada pembebanan maksimum sebesar 36,5 N, nilai deformasi maksimum pada material *Structural Steel* sebesar 1,17570 mm, sedangkan pada *Stainless Steel* sebesar 1,21840 mm.

Hasil analisis *normal stress* menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada kedua material masih berada di bawah nilai *yield strength* masing-masing material, sehingga struktur rangka dinyatakan aman terhadap pembebanan kerja yang diberikan. Selain itu, hasil analisis *normal strain* menunjukkan bahwa regangan yang terjadi masih berada dalam batas elastis material, sehingga struktur rangka masih mampu kembali ke kondisi awal setelah pembebanan dilepaskan.

Hasil validasi antara simulasi numerik dan pengujian aktual menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik dengan nilai error pada material *Structural Steel* berada pada rentang 1,008% hingga 1,014%, sedangkan pada *Stainless Steel* berada pada rentang 0,997% hingga 1,019%. Nilai error yang relatif rendah menunjukkan bahwa simulasi berbasis FEM mampu merepresentasikan kondisi aktual struktur dengan baik. Secara keseluruhan, material *Structural Steel* dinilai lebih

sesuai digunakan sebagai material rangka mesin briket arang karena memiliki kekakuan struktur yang lebih baik dibandingkan *Stainless Steel*. Selain itu, metode *Finite Element Method* (FEM) dapat digunakan sebagai pendekatan numerik yang efektif dalam mengevaluasi kekuatan struktur rangka mesin sebelum proses manufaktur dilakukan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan sifat mekanik material berpengaruh terhadap respons struktural rangka mesin, terutama terhadap deformasi, regangan elastis, dan tingkat keamanan struktur. Hasil penelitian memberikan implikasi praktis bahwa *Structural Steel* lebih direkomendasikan sebagai material rangka mesin briket arang karena memiliki kekakuan struktur yang lebih baik dibandingkan *Stainless Steel*. Penelitian ini juga memperlihatkan bahwa metode *Finite Element Method* (FEM) dapat digunakan sebagai pendekatan numerik yang efektif dalam mengevaluasi kekuatan struktur sebelum proses manufaktur dilakukan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memperluas kajian dengan menggunakan variasi material lain serta mempertimbangkan kondisi pembebanan yang lebih kompleks, seperti pembebanan dinamis dan analisis fatigue, sehingga evaluasi perilaku struktur dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Muhamad Safi'I, S.T., M.T. dan Bapak Hisyam Ma'mun, S.T., M.T. atas segala bimbingan, arahan, dan motivasi yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Moh Solikhul Umam atas dukungan dan kerja sama yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] M. A. Murrobbiy and F. Mulyana, "Perancangan dan Analisis Konstruksi Rangka Mesin Press Pencetak Batako," 2025.
- [2] N. Endriatno, La Ode Ahmad Barata, and Salimin, "Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pencacah Nilam dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Piston-JT*, vol. 9, no. 2, pp. 56–64, Dec. 2024, doi: 10.55679/pistonjt.v9i2.74.
- [3] R. D. E. Putra and A. Nuramal, "Design and thermo-mechanical analysis of a food packaging machine using ansys simulation," *Seminar Nasional Tahunan - Teknik Mesin*, vol. 23, no. 1, pp. 17–25, Mar. 2026, doi: 10.71452/3qk4x982.
- [4] A. Pratama and D. Agusman, "Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pres Batako Menggunakan Finite Element Method," *ASIIMETRIK*, pp. 221–230, Jul. 2023, doi: 10.35814/asiimetrik.v5i2.4658.
- [5] G. P. Firmansyah, F. I. Abdi, A. N. F. Ganda, T. Davareza, and D. D. Mubarak, "Studi Komparatif Kekuatan Struktural Dua Desain Poros Gandar Kereta Api Menggunakan FEA (ANSYS Workbench)," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 11, Apr. 2026.
- [6] N. Cholis, D. Montreano, and M. A. Lukmana, "OPTIMASI PRODUK MESIN PRESS PENCETAK BRIKETARANG SEKAM PADI," 2021.
- [7] R. Febritasari *et al.*, "Analisis Distribusi Tegangan dan Deformasi Pada Rangka Motor Trail dengan Metode Elemen Hingga," *seniati*, vol. 7, no. 1, pp. 142–148, Dec. 2023, doi: 10.36040/seniati.v7i1.8051.
- [8] W. Hilmansyah, D. Puspitasari, and T. Davareza, "Analisis Kekuatan Lifting Lug pada Proses Dismantling Chimney Berbasis Finite Element Analysis," *Jurnal Rekayasa Mesin*, 2025.
- [9] D. B. Pamungkas and I. K. A. Widi, "Analisis Perancangan Rangka Penyangga Mesin Injeksi Molding Plastik Vertikal Pneumatik dengan Pendekatan Metode Elemen Hingga," 2026.
- [10] A. Pratama and D. Agusman, "Desain dan Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pres Batako Menggunakan Finite Element Method," *ASIIMETRIK*, pp. 221–230, Jul. 2023, doi: 10.35814/asiimetrik.v5i2.4658.
- [11] D. I. Tsamroh, A. D. Putra, D. Puspitasari, C. Yazirin, and I. N. Sasongko, "ANALISIS KEKUATAN RANGKA MESIN PENGGIILING PADI BERBAHAN ASTM A500 MENGGUNAKAN SIMULASI FEM," Jun. 2025.
- [12] A. Pratama and D. Agusman, "Analysis of Frame Construction Strength in Belt Conveyor Design Using Ansys Workbench," *Sainteks*, vol. 5, no. 1, pp. 19–28, Mar. 2023, doi: 10.37577/sainteks.v5i1.527.
- [13] I. A. Ramadhan, A. H. Pane, and I. Zahar, "Desain dan Simulasi Screw Press Mesin Pencetak Briket," *IRA J.Tek. Mesin Dan Apl*, vol. 4, no. 3, pp. 208–214, Dec. 2025, doi: 10.56862/irajtma.v4i3.350.
- [14] M. W. Aninditya, M. S. Fadhil, and K. Mahfud, "Analisis Kekuatan Rangka Greenhouse Tipe Single Span Menggunakan Aplikasi Solidworks Simulation," *Armatur*, vol. 7, no. 1, pp. 206–215, Mar. 2026, doi: 10.24127/armatur.v7i1.11013.
- [15] E. Pranoto and E. Muthoriq, "Simulasi Distribusi Tegangan dan Deformasi pada Sasis Truk Light Duty dengan Variasi Panjang Rangka Sisi Menggunakan Metode Elemen Hingga".
- [16] T. Davareza, A. N. F. Ganda, D. Wulandari, D. D. Mubarak, and G. P. Firmansyah, "Studi Finite Element Analysis terhadap Kekuatan Struktural Dua Desain Roda Kereta Menggunakan ANSYS Workbench 17.2," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 03, 2025.
- [17] A. Pratama and D. Agusman, "ANALYSIS KEKUATAN KONTRUKSI RANGKA PADA PERANCANGAN DESIGN BELT CONVEYOR MENGGUNAKAN ANSYS WORKBENCH," vol. 5, no. 1, 2023.
- [18] H. Yuvendius and E. Zondra, "Design Dan Analisis Mesin Penghalus Bahan Baku Briket," vol. 10, no. 1, 2025.