

Studi Finite Element Analysis terhadap Respons Struktural Rangka Mesin Briket Arang Menggunakan Material AISI 1020 dan Structural Steel

Moh Solikhul Umam¹, Muhamad Safi², Hisyam Ma'mun³

^{1,2,3} Teknik Mesin, Universitas PGRI Semarang, Kota Semarang 50232, Indonesia
Email: ¹umamm550@gmail.com, ²muhamadsafii@upgris.ac.id, ³hisyam@upgris.ac.id
Email Penulis Korespondensi: muhamadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: AISI 1020 Deformation Finite Element Analysis Machine Frame Structural Steel	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kekuatan struktur rangka mesin briket arang menggunakan material AISI 1020 dan <i>Structural Steel</i> dengan metode <i>Finite Element Analysis</i> (FEA) berbantuan ANSYS Workbench. Penelitian dilakukan karena kajian perbandingan kedua material pada konstruksi rangka mesin briket arang serta validasi hasil simulasi terhadap kondisi aktual masih terbatas. Analisis dilakukan terhadap parameter <i>total deformation</i>, <i>normal stress</i>, dan <i>normal elastic strain</i> pada pembebanan 39,5 N hingga 66,5 N. Validasi dilakukan menggunakan dial indikator untuk membandingkan hasil simulasi dan pengujian aktual. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif respons struktural rangka mesin briket arang menggunakan material AISI 1020 dan <i>Structural Steel</i> yang dipadukan dengan validasi eksperimental menggunakan dial indikator dalam satu kerangka penelitian. Pendekatan ini memberikan informasi mengenai akurasi simulasi numerik sekaligus menjadi dasar pemilihan material rangka yang lebih aman dan efektif untuk aplikasi mesin briket arang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material AISI 1020 menghasilkan deformasi maksimum lebih kecil dibandingkan <i>Structural Steel</i>, yaitu 3,6194 mm dan 3,8373 mm pada pembebanan 66,5 N. Nilai <i>safety factor</i> AISI 1020 sebesar 8,95, lebih tinggi dibandingkan <i>Structural Steel</i> sebesar 6,39. Hasil validasi menunjukkan nilai error di bawah 3%, sehingga metode FEA memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap kondisi aktual struktur rangka.
Keywords: AISI 1020 Deformation Finite Element Analysis Machine Frame Structural Steel	This study aims to analyze and compare the structural strength of a charcoal briquette machine frame using AISI 1020 and Structural Steel materials through the Finite Element Analysis (FEA) method with ANSYS Workbench. The study was conducted because comparative investigations of these two materials for charcoal briquette machine frame construction, as well as the validation of simulation results against actual conditions, remain limited. The analysis was performed based on the parameters of total deformation, normal stress, and normal elastic strain under loading conditions ranging from 39.5 N to 66.5 N. Validation was carried out using a dial indicator to compare the simulation results with the experimental results. The novelty of this study lies in the comparative analysis of the structural response of a charcoal briquette machine frame using AISI 1020 and Structural Steel combined with experimental validation using a dial indicator within a single research framework. This approach provides information on the accuracy of numerical simulations while serving as a basis for selecting a safer and more effective frame material for charcoal briquette machine applications. The results show that AISI 1020 exhibited a lower maximum deformation than Structural Steel, measuring 3.6194 mm and 3.8373 mm, respectively, under a load of 66.5 N. The safety factor of AISI 1020 was 8.95, which was higher than that of Structural Steel at 6.39. The validation results showed an error of less than 3%, indicating that the FEA method has a high level of agreement with the actual structural conditions of the machine frame.

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



1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur mendorong penggunaan mesin produksi yang memiliki konstruksi kuat, stabil, dan mampu bekerja secara terus menerus guna mendukung proses produksi secara optimal. Salah satu komponen utama pada mesin adalah rangka yang berfungsi sebagai penopang seluruh komponen sekaligus menerima berbagai pembebanan selama proses pengoperasian berlangsung [1], [2]. Kekuatan dan kekakuan rangka sangat mempengaruhi kestabilan, keamanan, serta umur pakai mesin. Apabila struktur rangka mengalami deformasi berlebihan atau tegangan yang melampaui batas kemampuan material, maka dapat menyebabkan penurunan performa hingga kegagalan konstruksi [3]. Oleh karena itu, analisis kekuatan struktur menjadi tahapan penting dalam proses perancangan mesin agar konstruksi yang dihasilkan mampu bekerja secara aman [4].

Perkembangan metode analisis numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) memberikan kemudahan dalam mengevaluasi perilaku struktur pada berbagai konstruksi mekanik [5], [6]. Metode ini mampu menampilkan distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta tingkat keamanan struktur secara lebih detail dibandingkan pengujian konvensional [7]. Selain itu, simulasi numerik dapat digunakan untuk memprediksi respons struktur terhadap variasi pembebanan dan karakteristik material sebelum proses manufaktur dilakukan [8], [9]. FEA juga banyak dimanfaatkan dalam evaluasi berbagai material dan optimasi struktur pada komponen teknik untuk memperoleh desain yang lebih efisien tanpa mengurangi integritas struktural [10]. Penggunaan metode FEA dinilai lebih efisien karena dapat membantu mengurangi kesalahan desain, menghemat biaya pengujian, serta meminimalkan risiko kegagalan struktur saat mesin dioperasikan [11], [12].

Mesin briket arang merupakan salah satu mesin produksi yang digunakan untuk mencetak bahan baku arang menjadi briket dengan bentuk tertentu sehingga memiliki nilai ekonomis lebih tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif [13], [14]. Selama proses pengoperasian, rangka mesin menerima beban dari motor penggerak, sistem penekan, serta getaran mekanis yang terjadi pada proses pencetakan [15], [16]. Kondisi tersebut menyebabkan konstruksi rangka harus memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai agar seluruh komponen mesin tetap bekerja secara stabil [17]. Selain itu, pemilihan material rangka menjadi faktor penting karena setiap material memiliki karakteristik mekanik yang berbeda sehingga dapat mempengaruhi distribusi tegangan, regangan, deformasi, dan tingkat keamanan struktur [18], [19], [20], [21].

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menganalisis respons struktural pada konstruksi rangka dan komponen mekanik. Penelitian mengenai identifikasi kekakuan struktur penopang mesin menggunakan metode *experimental modal analysis* dan *finite element method* menunjukkan bahwa model simulasi mampu memprediksi frekuensi alami struktur dengan *maximum error* sebesar 7,1% dan nilai modal *assurance criterion* minimum sebesar 0,77, sehingga simulasi dinilai dapat merepresentasikan kondisi aktual struktur mesin [22]. Penelitian lain mengenai simulasi tabrakan pada rangka kendaraan listrik menggunakan metode *explicit dynamic finite element analysis* menunjukkan bahwa material ASTM A36 menghasilkan tegangan lebih tinggi dan *safety factor* lebih rendah dibandingkan Al-7075T6, sehingga lebih rentan mengalami deformasi permanen [23]. Selain itu, penelitian mengenai perlakuan *induction heat treatment* pada *structural steel* menunjukkan adanya peningkatan *buckling load capacity* sebesar 30%, peningkatan *bearing strength* sebesar 35%, serta peningkatan *yield strength* hingga 135% [24]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa lingkungan korosif dapat menurunkan sifat mekanik material AISI 1020 dengan penurunan *fatigue strength* hampir 50% pada kondisi dinamis, sehingga mempengaruhi kemampuan material dalam menerima pembebanan struktural [25]. Oleh sebab itu, dapat diketahui bahwa jenis material, distribusi pembebanan, dan kekakuan konstruksi sangat mempengaruhi respons struktural suatu rangka. Struktur dengan deformasi dan distribusi tegangan yang lebih rendah umumnya memiliki tingkat kestabilan dan keamanan yang lebih baik. Selain itu, validasi hasil simulasi numerik terhadap kondisi aktual juga diperlukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian model simulasi dengan perilaku nyata struktur saat menerima pembebanan.

Meskipun berbagai penelitian telah menerapkan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi kekuatan struktur rangka, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu jenis material atau hanya mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi tanpa melakukan validasi eksperimental secara langsung. Penelitian mengenai perbandingan material AISI 1020 dan *Structural Steel* pada rangka mesin briket arang juga masih sangat terbatas, terutama yang mengintegrasikan analisis *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor*, serta pengujian aktual dalam satu kajian. Selain itu, penelitian terdahulu umumnya belum memberikan dasar pemilihan material yang mempertimbangkan karakteristik mekanik dan tingkat kesesuaian hasil simulasi terhadap kondisi nyata. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengatasi keterbatasan penelitian terdahulu melalui analisis komparatif dua material dengan validasi eksperimental sehingga menghasilkan rekomendasi material yang lebih akurat untuk konstruksi rangka mesin briket arang. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif respons struktural dua material melalui

parameter *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, *safety factor*, serta validasi numerik dan aktual dalam satu tahapan penelitian. Kebaruan penelitian ini tidak hanya terletak pada perbandingan dua material yang umum digunakan pada konstruksi rangka mesin, tetapi juga pada integrasi analisis numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) dengan validasi eksperimental menggunakan dial indikator. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi tingkat akurasi simulasi terhadap kondisi aktual sehingga hasil penelitian tidak hanya memberikan informasi mengenai respons struktural masing-masing material, tetapi juga menghasilkan rekomendasi material yang lebih representatif untuk aplikasi rangka mesin briket arang.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan respons struktural rangka mesin briket arang menggunakan material AISI 1020 dan *Structural Steel* dengan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Analisis dilakukan berdasarkan parameter *total deformation*, *normal stress*, dan *normal elastic strain* untuk mengetahui karakteristik respons struktural masing-masing material terhadap pembebanan yang diberikan. Selain itu, hasil simulasi deformasi dibandingkan dengan hasil pengujian aktual menggunakan dial indikator guna mengetahui tingkat kesesuaian antara analisis numerik dan kondisi nyata struktur, sehingga dapat diperoleh material yang lebih aman digunakan pada konstruksi rangka mesin briket arang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model Fisik

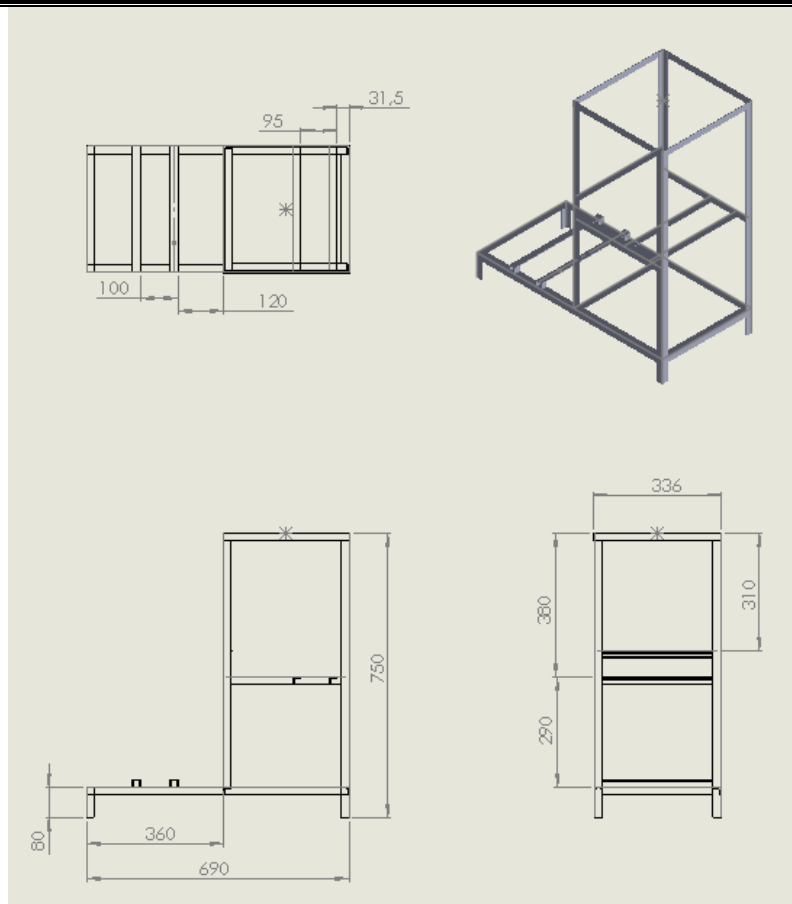
Struktur rangka mesin briket arang memiliki dimensi keseluruhan meliputi panjang 690 mm, lebar 336 mm, dan tinggi 750 mm. Pada bagian bawah rangka terdapat dudukan dengan panjang 360 mm serta tinggi kaki rangka sebesar 80 mm. Struktur rangka terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu bagian bawah dengan tinggi 280 mm dan bagian atas setinggi 380 mm. Rangka dibuat menggunakan profil hollow baja karbon rendah (*low carbon steel*) berukuran 20 mm × 20 mm dengan ketebalan 3 mm yang dilengkapi beberapa penyangga tambahan, meliputi jarak penyangga atas sebesar 130 mm, penyangga samping sebesar 95 mm, serta jarak antar penyangga bawah masing-masing 100 mm dan 120 mm. Baja karbon rendah yang digunakan memiliki densitas sebesar 7850 kg/m³, *modulus elastisitas* 200 GPa, *rasio Poisson* 0,30, *yield strength* 250 MPa, dan *ultimate strength* 460 MPa. Dimensi dan konfigurasi rangka tersebut dirancang untuk memberikan kestabilan serta meningkatkan kekuatan struktur dalam menerima pembebanan selama proses pengepresan briket arang berlangsung.



Gambar 1. Geometri struktur rangka mesin briket arang

2.2 Desain Mesin

Struktur rangka terdiri dari bagian bawah dan bagian atas yang dihubungkan dengan beberapa penyangga untuk meningkatkan kestabilan konstruksi. Dimensi dan konfigurasi rangka dirancang agar mampu menahan pembebanan statis selama proses pengoperasian mesin berlangsung. Desain dan etiket dimensi rangka ditunjukkan pada Gambar 2.



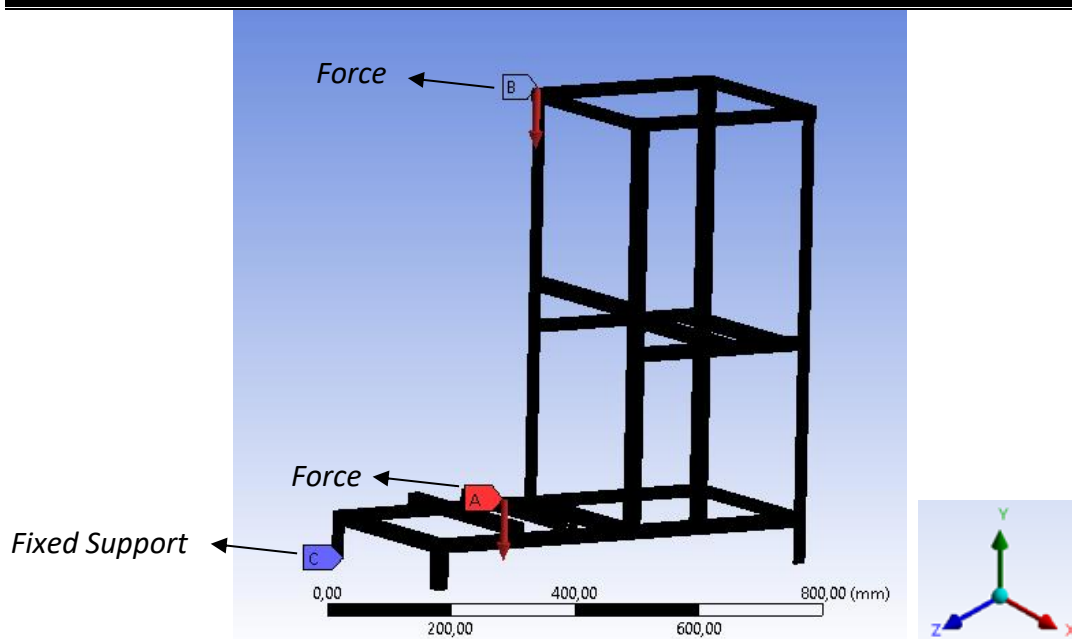
Gambar 2. Desain dan dimensi rangka mesin briket arang

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari AISI 1020 dan *Structural Steel*. Kedua material dipilih karena memiliki karakteristik mekanik yang umum digunakan pada konstruksi rangka mesin. Material *Structural Steel* memiliki massa jenis sebesar 7850 N/m^3 , nilai *Young's Modulus* sebesar 200000 MPa , *Poisson's Ratio* sebesar 0,3, *tensile yield strength* sebesar 250 MPa , serta *tensile ultimate strength* sebesar 460 MPa . Sementara itu, material AISI 1020 memiliki massa jenis sebesar 7850 N/m^3 , nilai *Young's Modulus* sebesar 212400 MPa , *Poisson's Ratio* sebesar 0,29, *tensile yield strength* sebesar 351 MPa , dan *tensile ultimate strength* sebesar 420 MPa . Seluruh data sifat mekanik tersebut dimasukkan ke dalam perangkat lunak ANSYS Workbench sebagai parameter pada proses simulasi numerik untuk menganalisis deformasi, tegangan, dan regangan pada struktur rangka mesin briket arang.

2.3 Studi Numerik

2.3.1 Domain Komputasi

Domain komputasi pada penelitian ini berupa model rangka mesin briket arang yang telah diimpor ke dalam perangkat lunak ANSYS Workbench. Analisis numerik dilakukan menggunakan metode *static structural* dengan kondisi batas berupa *fixed support* pada bagian kaki rangka yang bersentuhan langsung dengan lantai. pembebanan berupa gaya statis (*force*) diberikan pada bagian rangka yang menerima beban kerja mesin. Variasi pembebanan dilakukan mulai dari 39,5 N hingga 66,5 N untuk mengetahui respons struktur terhadap peningkatan pembebanan. Posisi *fixed support* dan *force* pada model simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.

**Gambar 3.** Domain komputasi dan kondisi batas simulasi

Simulasi dilakukan dengan beberapa asumsi, yaitu material bersifat homogen, isotropik, dan elastis linier sesuai hukum Hooke. Sambungan rangka diasumsikan sebagai sambungan sempurna (*bonded contact*), sedangkan pengaruh getaran dinamis, perubahan temperatur, serta tegangan sisa akibat proses pengelasan tidak diperhitungkan dalam simulasi. Asumsi tersebut digunakan untuk menyederhanakan model numerik sehingga proses komputasi dapat dilakukan secara efisien tanpa mengurangi representasi perilaku elastis struktur pada rentang pembebanan penelitian.

Analisis struktur pada penelitian ini menggunakan pendekatan elastis statik yang memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0 \quad (1)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan mengikuti hukum Hooke yang dinyatakan sebagai:

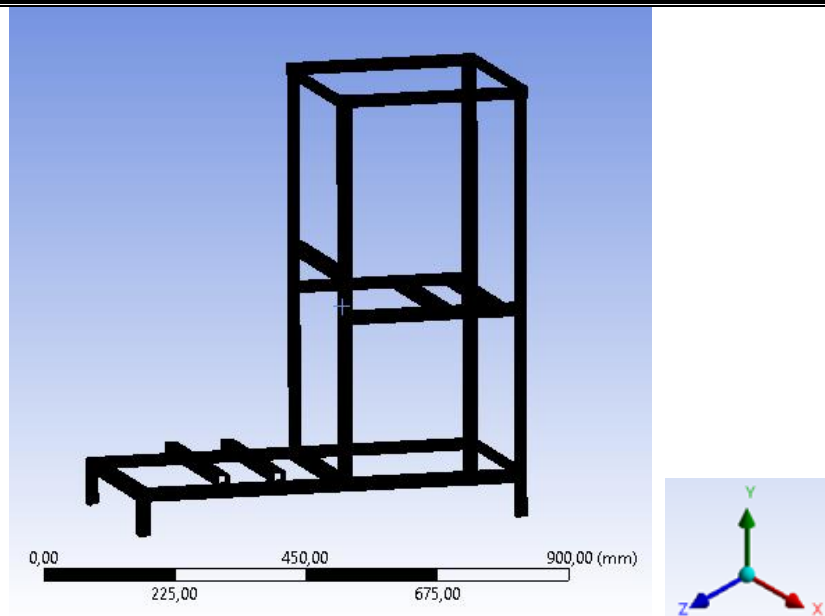
$$\sigma = D\varepsilon \quad (2)$$

Regangan pada elemen dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

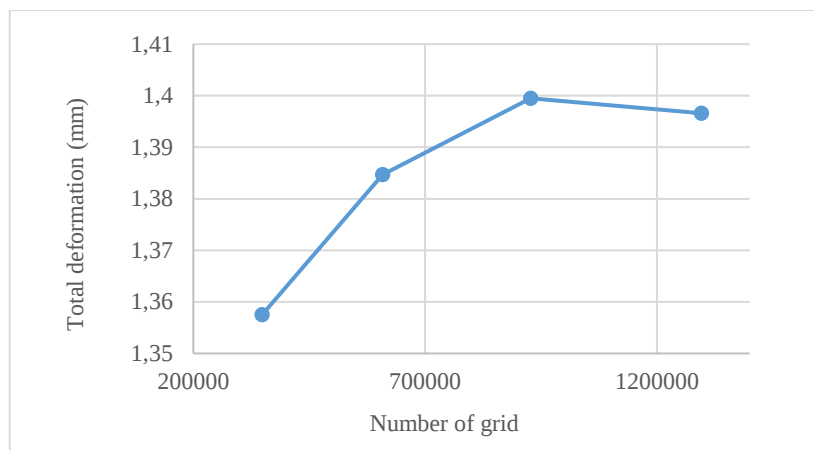
2.3.2 Meshing

Proses *meshing* dilakukan untuk membagi model struktur menjadi elemen-elemen kecil sehingga proses analisis numerik dapat dilakukan secara lebih detail. Meshing dilakukan menggunakan metode Automatic Method pada ANSYS Workbench dengan *pengaturan body sizing* sebesar 1,25 mm dan *smoothing* kategori *high* agar distribusi *mesh* lebih halus dan merata. Ukuran mesh dibuat sama pada kedua material penelitian untuk menjaga konsistensi hasil simulasi. Proses meshing model rangka ditunjukkan pada Gambar 4.

**Gambar 4.** Hasil *meshing* model rangka mesin briket arang

2.3.3 Uji *Grid Independent*

Uji *grid independent* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah elemen mesh yang digunakan. Pengujian dilakukan menggunakan beberapa variasi jumlah *grid* dengan parameter pengamatan berupa *total deformation average* akibat pembebanan sebesar 51,5 N. Hubungan jumlah *grid* terhadap nilai *total deformation* ditunjukkan pada Gambar 5.

**Gambar 5.** Grafik total deformasi

Perubahan nilai deformasi menjadi sangat kecil setelah jumlah elemen mencapai 927.924 dan 1.296.258. Selisih nilai deformasi hanya sekitar 0,21% sehingga simulasi dinyatakan telah mencapai kondisi konvergen. Oleh karena itu, *mesh* dengan jumlah *grid* 1296258 digunakan pada seluruh proses simulasi numerik selanjutnya.

Tabel 1. Data parameter analisis

<i>Grid</i>	Beban (N)	<i>Total Deformasi Average (mm)</i>
348226	51,5	1,3575
608140	51,5	1,3847
927924	51,5	1,3995
1296258	51,5	1,3966

2.3.4 Set Up Simulasi

Simulasi numerik dilakukan menggunakan *metode Finite Element Analysis* (FEA) berbantuan ANSYS Workbench. Simulasi dilakukan pada dua jenis material, yaitu AISI 1020 dan *Structural Steel*, dengan 10 variasi pembebanan dari 39,5 N hingga 66,5 N. Parameter yang dianalisis meliputi *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor*. *Total deformation* digunakan untuk mengetahui tingkat perpindahan struktur akibat pembebanan, sedangkan *normal stress* digunakan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada struktur. Selain itu, *normal elastic strain* digunakan untuk mengetahui besarnya regangan elastis akibat pembebanan.

2.3.5 Validasi

Validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik menggunakan *metode Finite Element Analysis* (FEA) dan hasil pengujian aktual pada struktur rangka mesin briket arang. Pengujian aktual dilakukan menggunakan dial indikator untuk mengukur deformasi pada struktur rangka mesin briket arang. Pembebanan diberikan secara bertahap sesuai variasi gaya pada simulasi numerik, sedangkan pembacaan deformasi dilakukan setelah posisi jarum dial indikator stabil. Setiap kondisi pembebanan dilakukan dengan prosedur dan titik pengukuran yang sama sehingga konsistensi hasil pengukuran tetap terjaga. Validasi dilakukan menggunakan jumlah *grid* optimum sebesar 1.296.258 elemen dengan variasi pembebanan 39,5 N hingga 66,5 N. Parameter yang digunakan sebagai pembanding adalah *total deformation* karena parameter tersebut dapat menunjukkan respons struktur terhadap pembebanan yang diberikan. Perbandingan antara hasil aktual dan hasil numerik dilakukan dengan menghitung nilai persentase error. Nilai error digunakan untuk mengetahui tingkat penyimpangan hasil simulasi terhadap hasil pengujian aktual. Semakin kecil nilai error yang diperoleh, maka semakin baik tingkat kesesuaian model numerik terhadap kondisi aktual struktur rangka. Nilai error dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Selain menggunakan persentase error, tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan hasil pengujian aktual juga dievaluasi menggunakan parameter statistik berupa *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2). Parameter tersebut digunakan untuk menilai besarnya penyimpangan rata-rata hasil simulasi terhadap hasil eksperimen serta kemampuan model numerik dalam merepresentasikan data aktual.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_n - X_a)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_n - X_a| \quad (6)$$

$$R = 1 - \frac{\sum (X_a - X_n)^2}{\sum (X_a - X_a)^2} \quad (7)$$

Tabel 2. Data validasi AISI 1020

Beban (N)	Total Deformasi Aktual (mm)	Total Deformasi Numerik (mm)	Error (%)
39,5	2,84	2,7806	2,0915
42,5	2,94	2,8737	2,2551
45,5	3,03	2,967	2,0792
48,5	3,13	3,0602	2,23
51,5	3,22	3,1534	2,0683
54,5	3,32	3,2466	2,2108
57,5	3,41	3,3398	2,0587
60,5	3,51	3,433	2,1937
63,5	3,6	3,5262	2,05
66,5	3,7	3,6194	2,1784

Tabel 3. Data validasi *Structural Steel*

Beban (N)	Total Deformasi Aktual (mm)	Total Deformasi Numerik (mm)	Error (%)
39,5	2,84	2,9485	3,8204
42,5	2,94	3,0472	3,6463
45,5	3,03	3,146	3,8284
48,5	3,13	3,2448	3,6677
51,5	3,22	3,3435	3,8354
54,5	3,32	3,4423	3,6837
57,5	3,41	3,541	3,8416
60,5	3,51	3,6398	3,698
63,5	3,6	3,7386	3,85
66,5	3,7	3,8373	3,7108

Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai deformasi hasil simulasi memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian aktual pada seluruh variasi pembebanan. Pada material AISI 1020 diperoleh nilai error berkisar antara 2,05% hingga 2,26%, sedangkan pada material *Structural Steel* berkisar antara 3,64% hingga 3,85%. Nilai error yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku aktual struktur rangka dengan tingkat akurasi yang baik.

2.3.5 Reduksi Data Numerik

Data hasil simulasi numerik dan pengujian aktual dianalisis secara komparatif untuk mengetahui karakteristik kekuatan struktur rangka mesin briket arang pada material AISI 1020 dan *Structural Steel*. Analisis dilakukan berdasarkan parameter *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor* untuk mengevaluasi respons struktural rangka pada setiap variasi pembebanan yang diberikan. Nilai *safety factor* dihitung menggunakan persamaan berikut:

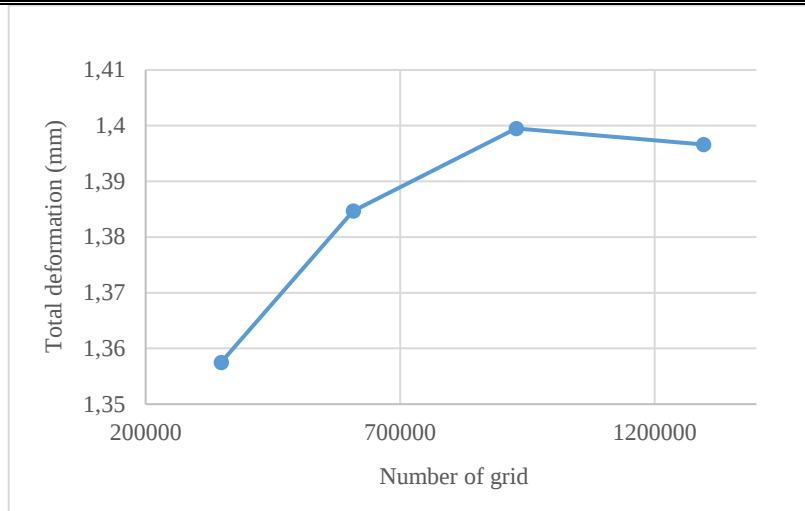
$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} \quad (8)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh uji *Grid*

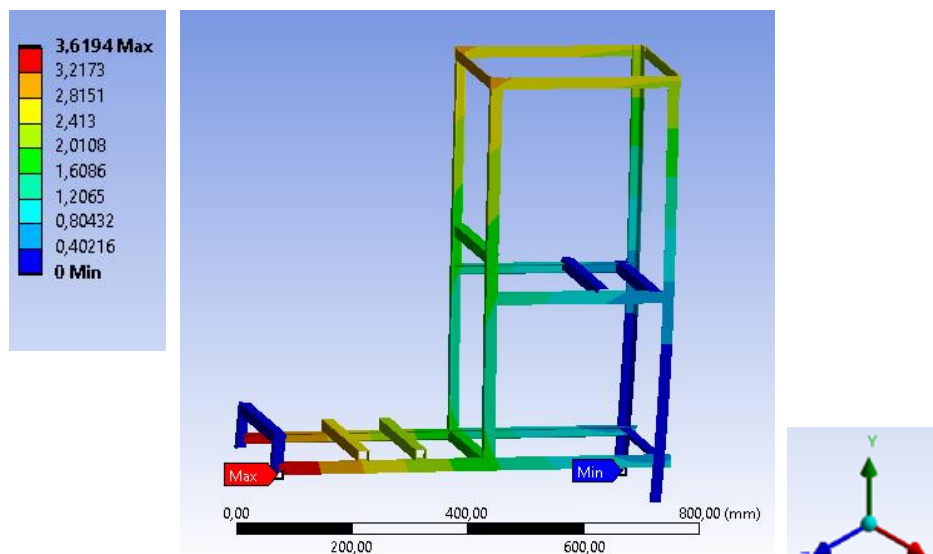
Uji *grid independency* dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen mesh terhadap hasil simulasi numerik pada struktur rangka mesin briket arang. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah *grid* yang digunakan pada proses meshing. Parameter yang digunakan pada pengujian ini adalah *total deformation* average akibat pembebanan sebesar 51,5 N. Variasi jumlah *grid* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 348.226, 608.140, 927.924, dan 1.296.258 elemen. Semakin besar jumlah *grid* yang digunakan maka distribusi elemen pada model akan semakin rapat sehingga hasil simulasi dapat merepresentasikan kondisi struktur secara lebih detail. Namun peningkatan jumlah *grid* juga menyebabkan waktu komputasi menjadi lebih lama karena jumlah elemen yang dihitung semakin banyak.

Hubungan jumlah *grid* terhadap nilai *total deformation* ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan hasil pengujian, nilai deformasi pada *grid* pertama sebesar 1,3575 mm. Pada *grid* kedua nilai deformasi meningkat menjadi 1,3847 mm. Selanjutnya pada *grid* ketiga deformasi meningkat menjadi 1,3995 mm, sedangkan pada *grid* keempat sedikit menurun menjadi 1,3966 mm. Perubahan nilai deformasi pada *grid* ketiga dan keempat relatif sangat kecil dengan selisih sekitar 0,21%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen sehingga penambahan jumlah elemen mesh tidak lagi memberikan perubahan signifikan terhadap hasil simulasi.



Gambar 7. Grafik hubungan jumlah *grid* terhadap *total deformation*

Untuk memperjelas hasil uji *grid independency*, distribusi *total deformation* pada model dengan jumlah *grid* 1.296.258 elemen ditunjukkan pada Gambar 8. Kontur deformasi yang dihasilkan menunjukkan distribusi deformasi yang halus. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa jumlah elemen yang digunakan telah mampu merepresentasikan respons struktur dengan baik sehingga hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen.



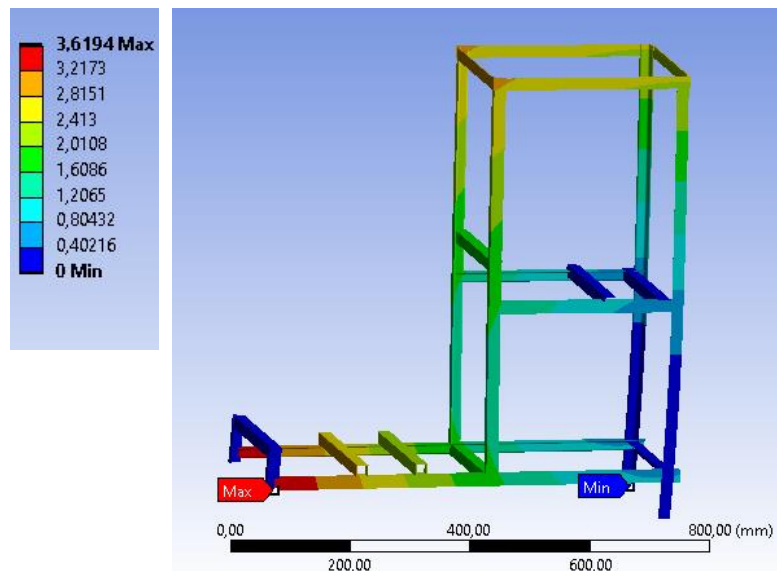
Gambar 8. Kontur *total deformation* pada *grid* 1.296.258

Berdasarkan hasil tersebut, jumlah *grid* sebesar 1.296.258 elemen dipilih sebagai *grid* optimum karena menghasilkan nilai deformasi yang stabil dengan perubahan yang sangat kecil dibandingkan *grid* sebelumnya. Selain itu, jumlah *grid* tersebut mampu memberikan keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi.

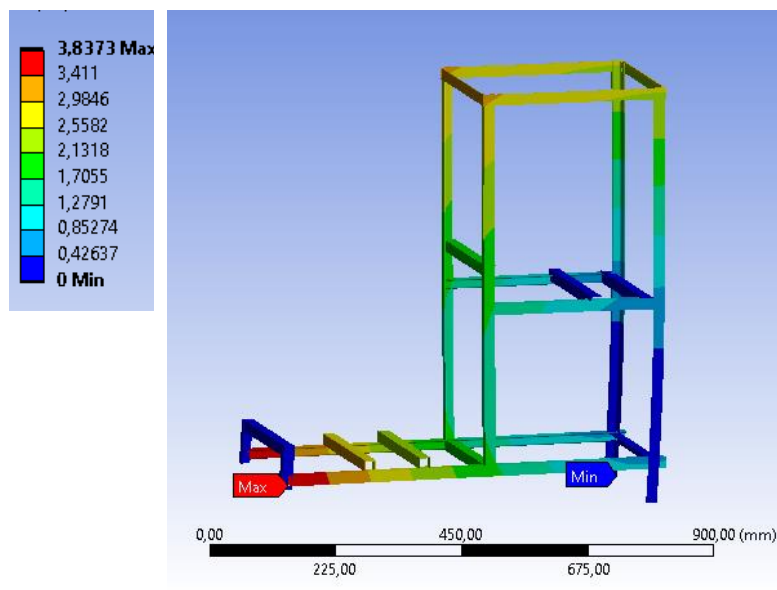
3.2 Pengaruh Pembebanan terhadap Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, simulasi numerik dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) pada struktur rangka mesin briket arang dengan material AISI 1020 dan *Structural Steel*. Variasi pembebanan diberikan mulai dari 39,5 N hingga 66,5 N untuk mengetahui pengaruh pembebanan terhadap respons struktur. Parameter yang dianalisis meliputi *total deformation*, *normal stress*, *normal elastic strain*, dan *safety factor*. 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* pada kedua material ditunjukkan pada Gambar 9, sedangkan kontur distribusi *total deformation* material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Kontur *total deformation* material AISI 1020

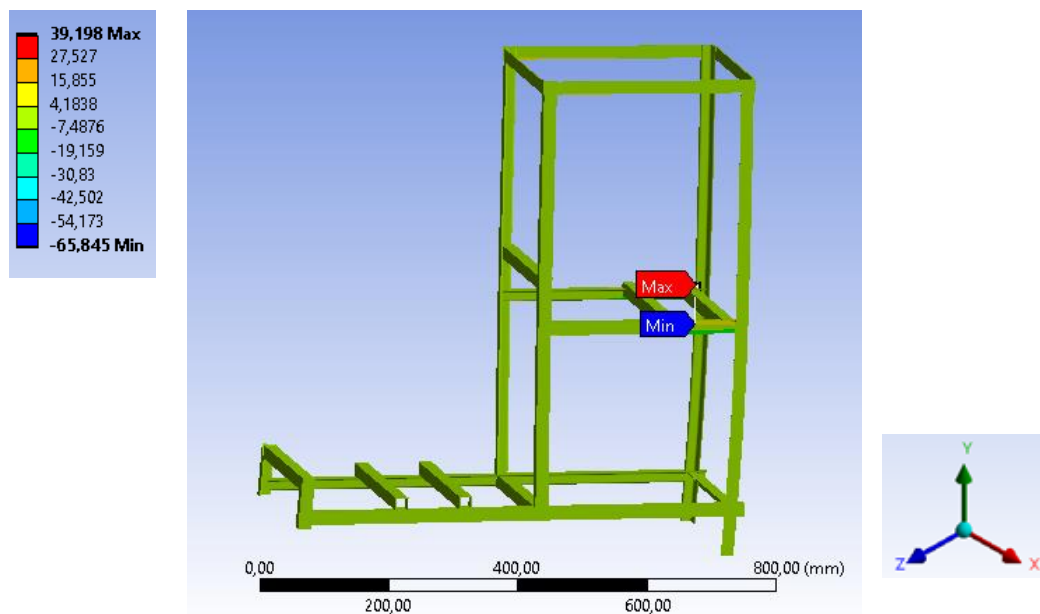


Gambar 10. Kontur *total deformation* material *Structural Steel*

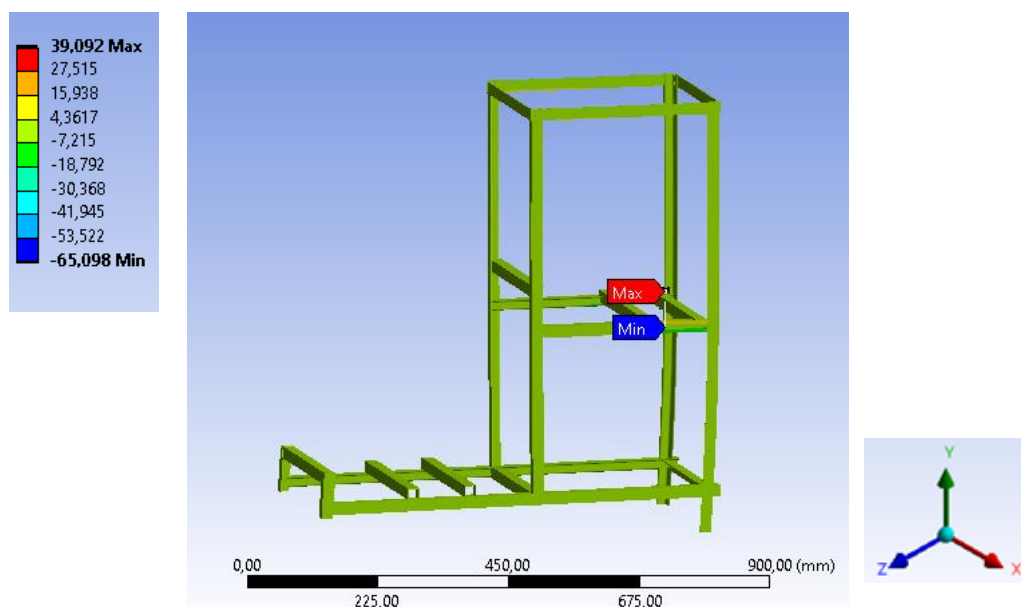
Berdasarkan hasil simulasi, material AISI 1020 menghasilkan nilai deformasi yang lebih kecil dibandingkan *Structural Steel* pada seluruh variasi pembebanan. Pada pembebanan maksimum 66,5 N, nilai deformasi maksimum material AISI 1020 sebesar 3,6194 mm, sedangkan *Structural Steel* sebesar 3,8373 mm. Hal tersebut menunjukkan bahwa material AISI 1020 memiliki tingkat kekakuan struktur yang lebih baik sehingga mampu menahan perpindahan struktur lebih kecil saat menerima pembebanan.

Deformasi yang lebih rendah pada material AISI 1020 dipengaruhi oleh nilai modulus elastisitas dan yield strength yang lebih tinggi dibandingkan *Structural Steel*. Berdasarkan teori mekanika material, material dengan modulus elastisitas yang lebih besar memiliki kekakuan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan perpindahan yang lebih kecil pada pembebanan yang sama. Selain itu, yield strength AISI 1020 yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan material dalam mempertahankan deformasi elastis sebelum memasuki daerah plastis.

Selain deformasi, peningkatan pembebanan juga menyebabkan distribusi tegangan pada struktur meningkat secara bertahap. Tegangan maksimum umumnya terjadi pada area sambungan rangka dan bagian yang menerima gaya terbesar. Kondisi tersebut disebabkan karena area sambungan menjadi titik konsentrasi tegangan akibat perubahan arah distribusi gaya pada struktur. Kontur distribusi *normal stress* material AISI 1020 ditunjukkan pada Gambar 11, sedangkan material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 12.



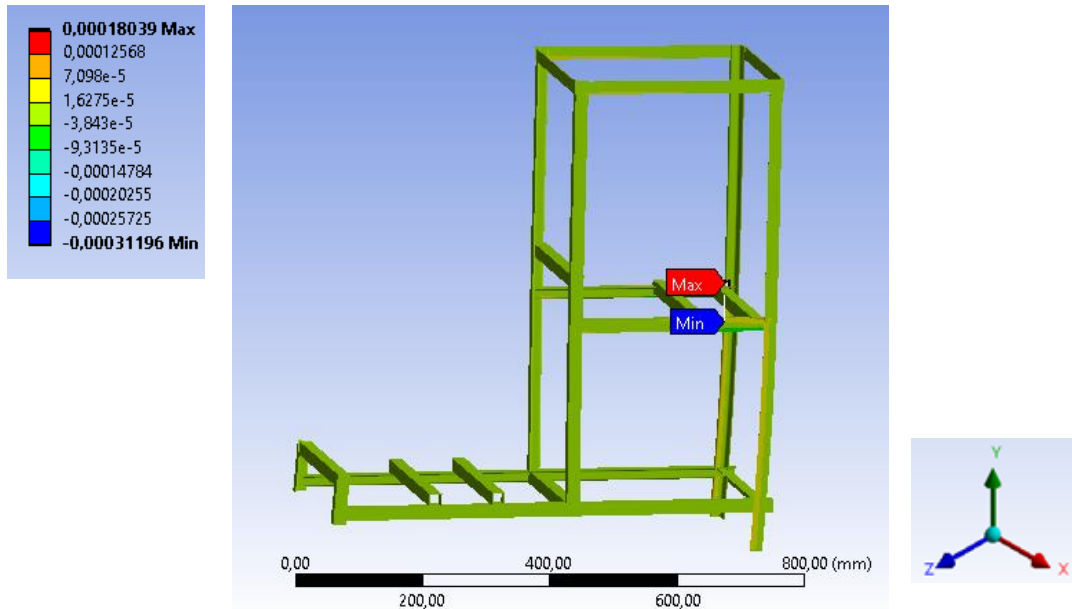
Gambar 11. Kontur *normal stress* material AISI 1020



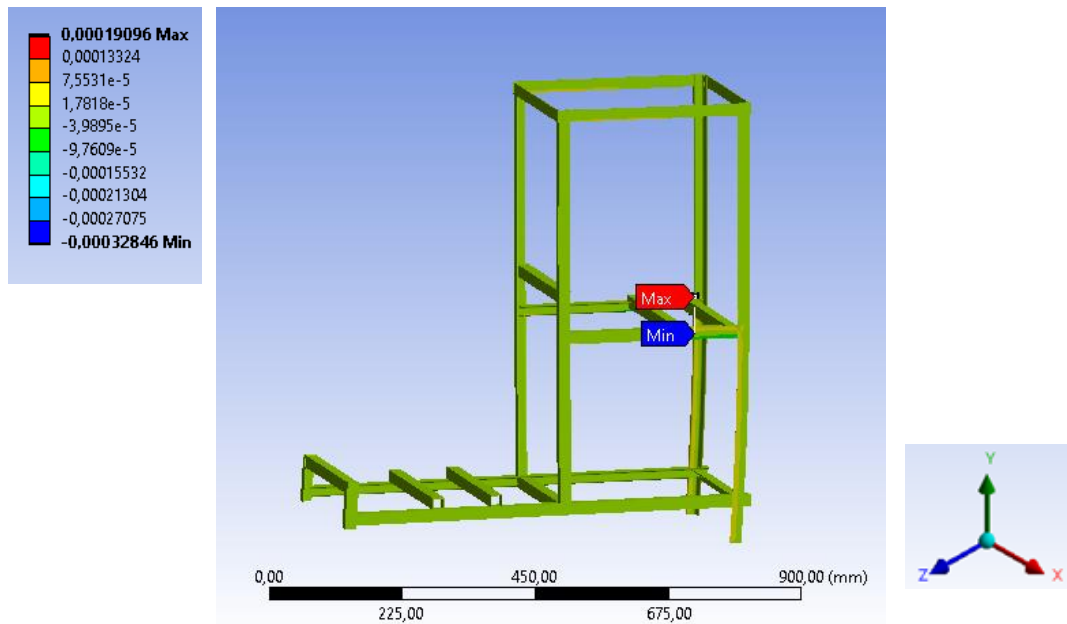
Gambar 12. Kontur *normal stress* material *Structural Steel*

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *normal stress* maksimum pada material AISI 1020 sebesar 39,198 MPa, sedangkan pada *Structural Steel* sebesar 39,092 MPa. Nilai tegangan tersebut masih berada di bawah batas yield strength masing-masing material sehingga struktur rangka masih berada pada kondisi aman terhadap pembebanan yang diberikan. Distribusi tegangan yang lebih tinggi pada area sambungan menunjukkan bahwa bagian tersebut menjadi titik kritis yang perlu diperhatikan dalam proses perancangan rangka mesin.

Peningkatan pembebanan juga menyebabkan nilai normal elastic strain meningkat pada kedua material. Regangan elastis maksimum terjadi pada area yang mengalami deformasi terbesar dan memiliki konsentrasi tegangan tinggi. Kontur distribusi *normal elastic strain* material AISI 1020 ditunjukkan pada Gambar 13, sedangkan material *Structural Steel* ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Kontur *normal elastic strain* material AISI 1020



Gambar 14. Kontur *normal elastic strain* material *Structural Steel*

Nilai *normal elastic strain* maksimum pada material AISI 1020 sebesar $1,8039 \times 10^{-4}$, sedangkan pada material *Structural Steel* sebesar $1,9096 \times 10^{-4}$. Nilai regangan yang lebih kecil pada material AISI 1020 menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kestabilan struktur selama menerima pembebanan. Hal tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik material AISI 1020 yang memiliki kekakuan dan kekuatan lebih baik dibandingkan *Structural Steel* sehingga deformasi dan regangan yang terjadi lebih kecil.

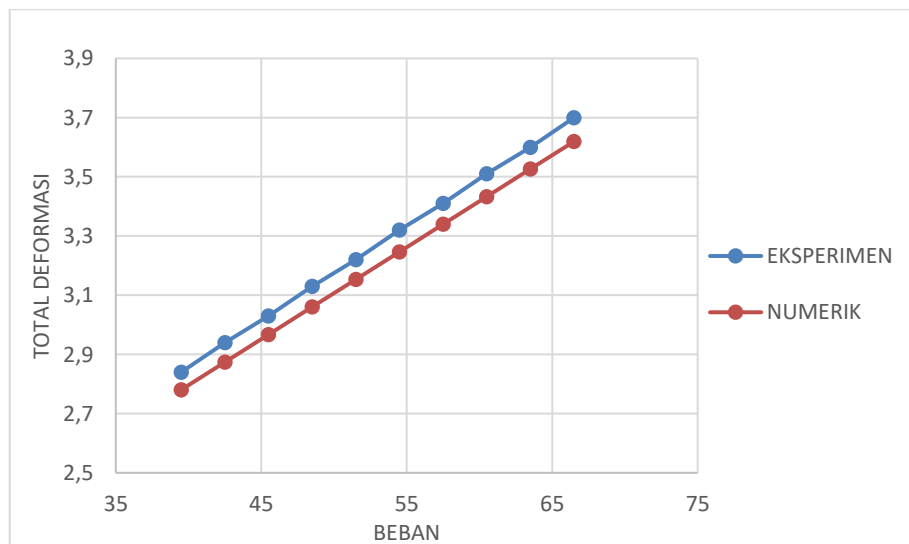
Tabel 4. Hasil perhitungan *safety factor*

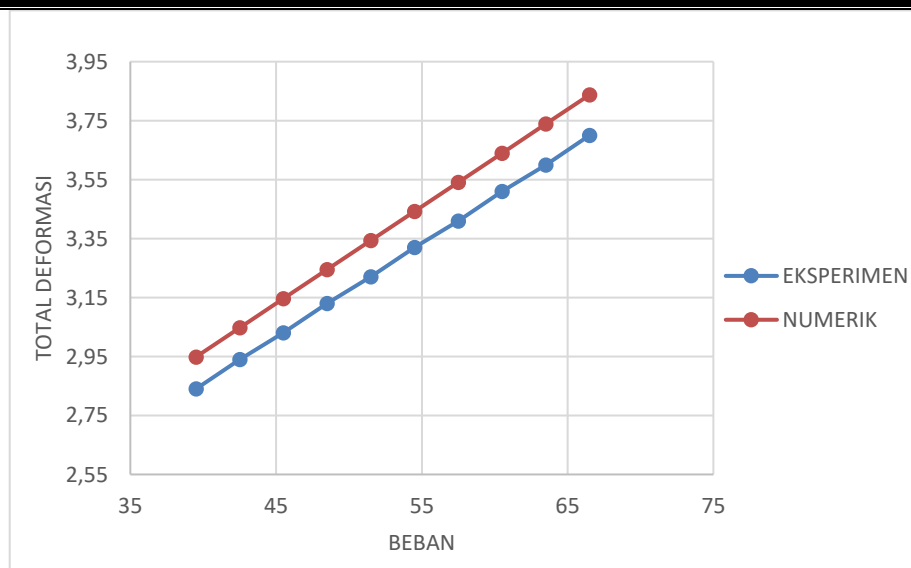
Material	Yield Strength (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Safety Factor
AISI 1020	351	39,198	8,95
Structural Steel	250	39,092	6,39

Berdasarkan Tabel 4, pada pembebanan 66,5 N material AISI 1020 memiliki nilai *safety factor* sebesar 8,95, lebih tinggi dibandingkan *Structural Steel* sebesar 6,39. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa material AISI 1020 memiliki tingkat keamanan struktur yang lebih baik dalam menerima pembebanan statis. Meskipun kedua material mengalami peningkatan tegangan akibat pembebanan, seluruh nilai tegangan maksimum yang diperoleh masih berada di bawah batas *yield strength* masing-masing material sehingga struktur rangka masih dinyatakan aman digunakan pada kondisi pembebanan yang diberikan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa karakteristik mekanik material sangat mempengaruhi distribusi tegangan dan tingkat keamanan struktur hasil simulasi FEA [23]. Selain itu, hasil penelitian ini juga konsisten dengan penelitian yang menyatakan bahwa validasi eksperimental diperlukan untuk memastikan tingkat kesesuaian model numerik terhadap perilaku aktual struktur [22]. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa pemilihan material dengan sifat mekanik yang lebih baik mampu meningkatkan kekakuan dan keamanan struktur rangka mesin.

Hasil validasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum hasil simulasi numerik memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian aktual pada seluruh variasi pembebanan. Nilai error pada material AISI 1020 berada pada rentang 2,05% hingga 2,26%, sedangkan pada material *Structural Steel* berada pada rentang 3,64% hingga 3,85%. Nilai error yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku aktual struktur rangka mesin briket arang dengan tingkat akurasi yang baik.

**Gambar 15.** Grafik validasi deformasi material AISI 1020



Gambar 16. Grafik validasi deformasi material *Structural Steel*

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan bahwa kurva deformasi hasil simulasi dan aktual memiliki pola peningkatan yang hampir identik seiring bertambahnya pembebanan. Untuk memperkuat hasil validasi tersebut, dilakukan evaluasi statistik menggunakan *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, dan koefisien determinasi (R^2). Hasil perhitungan statistik disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan *RMSE*, *MAE*, R^2

Material	RMSE (mm)	MAE (mm)	R^2
<i>AISI 1020</i>	0,0703	0,07	0,9339
<i>Structural Steel</i>	0,1234	0,1229	0,7963

Berdasarkan Tabel 5, material *AISI 1020* memiliki nilai *RMSE* sebesar 0,0703 mm, *MAE* sebesar 0,07 mm, dan R^2 sebesar 0,9339. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model numerik memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik terhadap hasil pengujian aktual. Sementara itu, material *Structural Steel* menghasilkan *RMSE* sebesar 0,1234 mm, *MAE* sebesar 0,1229 mm, dan R^2 sebesar 0,7963. Meskipun masih menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik, akurasi model pada material *Structural Steel* lebih rendah dibandingkan *AISI 1020*.

Perbedaan kecil yang terjadi antara hasil numerik dan aktual dipengaruhi oleh idealisasi model simulasi, kondisi pembebanan aktual, kualitas mesh, serta ketelitian pembacaan dial indikator saat pengujian dilakukan. Berdasarkan nilai persentase error, *RMSE*, *MAE*, dan R^2 , metode *Finite Element Analysis (FEA)* mampu merepresentasikan perilaku aktual struktur rangka mesin briket arang dengan tingkat akurasi yang baik. Hasil validasi tersebut juga memperkuat bahwa material *AISI 1020* memberikan tingkat kesesuaian simulasi yang lebih tinggi dibandingkan *Structural Steel* sehingga lebih direkomendasikan untuk aplikasi rangka mesin briket arang.

3.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Simulasi dilakukan menggunakan asumsi material elastis linier, homogen, dan isotropik sehingga belum mempertimbangkan pengaruh plastisitas material, tegangan sisa akibat proses pengelasan, maupun beban dinamis yang terjadi selama pengoperasian mesin. Selain itu, validasi dilakukan menggunakan parameter deformasi sehingga parameter tegangan dan regangan belum dapat diverifikasi secara langsung melalui pengujian eksperimental. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis dinamis, mempertimbangkan pengaruh sambungan las, serta mengintegrasikan metode optimasi struktur untuk memperoleh desain rangka yang lebih efisien.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbantuan ANSYS Workbench, peningkatan pembebanan dari 39,5 N hingga 66,5 N menyebabkan nilai deformasi, tegangan, dan regangan pada kedua material meningkat. Deformasi terbesar terjadi pada bagian rangka yang menerima beban langsung, sedangkan tegangan dan regangan terbesar terjadi pada sambungan rangka.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa material AISI 1020 memiliki performa lebih baik dibandingkan *Structural Steel*. Pada pembebanan 66,5 N, deformasi maksimum AISI 1020 sebesar 3,6194 mm, lebih kecil dibandingkan *Structural Steel* sebesar 3,8373 mm, sehingga AISI 1020 lebih kaku dan lebih mampu menahan beban.

Analisis menunjukkan bahwa tegangan kedua material masih berada di bawah *yield strength* sehingga struktur dinyatakan aman. AISI 1020 memiliki *safety factor* lebih tinggi, yaitu 8,95, sedangkan *Structural Steel* sebesar 6,39. Selain itu, kedua material masih berada pada daerah elastis sehingga dapat kembali ke bentuk semula setelah pembebanan dilepaskan.

Hasil validasi simulasi dan pengujian aktual menunjukkan nilai error di bawah 3%, sehingga metode FEA dinilai memiliki kesesuaian yang baik dengan kondisi nyata. Secara keseluruhan, material AISI 1020 lebih efektif digunakan sebagai rangka mesin briket arang karena memiliki deformasi lebih kecil dan tingkat keamanan struktur yang lebih baik dibandingkan *Structural Steel*.

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui penerapan pendekatan yang mengintegrasikan analisis numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) dengan validasi eksperimental untuk mengevaluasi respons struktural rangka mesin briket arang menggunakan dua jenis material yang berbeda. Dari aspek praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar dalam menentukan material rangka yang memiliki kinerja struktural lebih baik, ditinjau dari kekuatan, kekakuan, dan tingkat keandalannya, sehingga mendukung pengembangan konstruksi mesin briket arang yang lebih aman, efisien, dan memiliki umur layanan yang lebih panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Muhamad Safi'i S.T., M.T., dan Bapak Hisyam Ma'mun S.T., M.T. atas bimbingan dan dukungan dalam penyusunan penelitian ini, Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada saudara Raihan Aji Yunanto selaku rekan penelitian atas kerja sama dan kontribusinya sehingga penelitian dan penulisan karya ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] H. Istiqlaliyah, "Perancangan Rangka Mesin Pembuat Keripik Umbi Dengan Aplikasi Sistem Pneumatik," *J*, vol. 3, no. 2, pp. 112–121, Jan. 2021, doi: 10.29407/jmn.v3i2.15575.
- [2] R. M. Ferro, W. G. Ferreira, and A. F. G. Calenzani, "Dynamic Analysis of Support Frame Structures of Rotating Machinery," 2014, doi: DOI: 10.34257/gjre.
- [3] D. I. Tsamroh, A. D. Putra, D. Puspitasari, C. Yazirin, and I. N. Sasongko, "ANALISIS KEKUATAN RANGKA MESIN PENGILING PADI BERBAHAN ASTM A500 MENGGUNAKAN SIMULASI FEM," 2025, doi: 10.33474/rme.v5i1.23494.
- [4] J. Y. Zaira and M. T. I. Pradana, "Rancang Bangun dan Analisa Kekuatan Rangka Mesin Pencuci Singkong Metode Rotary dengan Solidworks Simulation," *elementer*, vol. 8, no. 2, pp. 205–213, Nov. 2022, doi: 10.35143/elementer.v8i2.5579.
- [5] S. Rasoulzadeh *et al.*, "A Novel Integrative Design Framework Combining 4D Sketching, Geometry Reconstruction, Micromechanics Material Modelling, and Structural Analysis," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 57, p. 102074, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102074.
- [6] 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, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin>
- [7] T. Wijaya, "Kinerja Seismik Struktur Gable Frame Baja dengan Rafter Honeycomb Menggunakan Elemen Hingga 3D," 2026, doi: doi.org/10.31599/wtcpyj59.
- [8] C. W. Ziemian and R. D. Ziemian, "Steel benchmark frames for structural analysis and validation studies: Finite element models and numerical simulation data," *Data in Brief*, vol. 39, p. 107564, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.dib.2021.107564.

- [9] V. Dario, G. Michelangelo-Santo, B. Roberto, and F. Fabio, "Is All-on-four effective in case of partial mandibular resection? A 3D finite element study," *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 124, no. 5, p. 101463, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jormas.2023.101463.
- [10] S. Alsarayefi, N. Najm, M. M. Mansour, and A. M. Lafta, "Topology-driven structural optimization and cross-material robustness assessment of automotive wheel rims using finite element analysis," *Journal of Engineering Research*, p. S2307187726002166, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.jer.2026.06.003.
- [11] J. Zhuang and F. Zeng, "Research and Experimental Verification of an Efficient Subframe Lightweighting Method Integrating SIMP Topology and Size Optimization," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, p. 8192, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15158192.
- [12] Q. Zhu, Q. Han, J. Liu, and C. Yu, "High-Accuracy Finite Element Model Updating a Framed Structure Based on Response Surface Method and Partition Modification," *Aerospace*, vol. 10, no. 1, p. 79, Jan. 2023, doi: 10.3390/aerospace10010079.
- [13] M. R. Akbar, D. Wulandari, F. Y. Utama, and A. N. Fitri, "Rancang Bangun Mesin Screw Extruder Arang Briket Berbahan Baku Batok Kelapa Semi Otomatis," *Jurnal Rekayasa Mesin*, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin>
- [14] S. Nonsawang, S. Juntahum, P. Sanchumpu, W. Suaili, K. Senawong, and K. Laloon, "Unlocking renewable fuel: Charcoal briquettes production from agro-industrial waste with cassava industrial binders," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 4966–4982, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.10.053.
- [15] M. C. Nugroho and S. F. Nurhayati, "Produksi Pembuatan Briket Arang Dari Pengolahan Limbah Tempurung Kelapa Sebagai Sumber Energi Terbarukan," vol. 2, no. 2, 2024, doi: 10.23917/determinasi.v2i2.226.
- [16] S. Jito, B. Lau, R. Ibrahim, and Z. Mohid, "Structure Analysis of Micro-Milling Machine Construction Frame Design," *IJETT*, vol. 69, no. 1, pp. 205–212, Jan. 2021, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I1P231.
- [17] S. G. Lawolo, I. G. Nugraha, R. Setiawan, and C. Tabayyun, "Analisis Kekuatan Frame Trailer menggunakan Finite Element Methode (FEA)," 2026, doi: 10.70609/metrotech.v4i2.7138.
- [18] Q. Hui, L. Yan, P. Yang, and Q. Lin, "Stress distribution and optimization scheme of the 'New Beam-Arch Connection' in continuous rigid-frame arch bridge," *Results in Engineering*, vol. 28, p. 107692, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107692.
- [19] L. A. Rayyan, J. Sumarjo, and F. A. Pratama, "Analisis Frame Sepeda Listrik Roda Tiga Bagi Lansia dan Penyandang Disabilitas Menggunakan Metode Elemen Hingga," 2025, doi: 10.70609/metrotech.v4i3.7358.
- [20] N. Sari, F. M. Alni, A. Imran, and M. P. Sari, "Analisis dan Desain Frame Eksoskeleton Lower Limb Dengan Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA)," 2026, doi: 10.18860/jomi.v1i1.37730.
- [21] F. Alhaffis and R. Fajrul, "Pengaruh Konfigurasi Orientasi Serat 00 Dan 450 Karbon/Epoksi (Woven) terhadap Karakterisasi Mekanik Drive Shaft," *elementer*, vol. 7, no. 2, pp. 109–119, Nov. 2021, doi: 10.35143/elementer.v7i2.5144.
- [22] Z.-W. Zhuang, J.-C. Lu, and D.-S. Liu, "A novel identification technique of machine tool support stiffness under the variance of structural weight," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 119, no. 1–2, pp. 247–259, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08257-y.
- [23] A. Bahatmaka *et al.*, "Material performance analysis in frontal collision simulation of electric vehicle frames using explicit dynamic finite element analysis method," *Results in Engineering*, vol. 28, p. 107130, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107130.
- [24] K. Skalomenos, M. Zwain, S. Jamshiyas, and P. Kastiza, "Initial findings of induction heat treatment technology for structural steel performance enhancement," *Structures*, vol. 88, p. 111946, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.istruc.2026.111946.
- [25] A. Miguel Sarmiento, A. M. Rodriguez-Perez, J. M. Davila, and M. Luisa De La Torre, "Effect of acid mine drainage on the mechanical properties of AISI 1020 carbon steel and AW6060 aluminium," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 32, pp. 541–549, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.07.099.