MACHINERY JURNAL TEKNOLOGI TERAPAN
VOL.7 NO.2, JUNI 2026

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

STUDI KEKUATAN RANGKA MESIN PENGAYAK BIJI KOPI DENGAN PENDEKATAN SIMULASI FEA

Muhammad Insanul Kamil[1)*], Fenoria Putri[2)], Muhammad Irfan Dzaky[2)]
[1)] Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Politeknik Negeri Sriwijaya
[2)]Program Studi Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139, Indonesia
[*]email korespondensi: putripolsri@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

Received:
25/06/2026

Received in revised:
13/08/2026

Accepted:
25/08/2026

Online-Published:
28/08/2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi kekuatan rangka mesin pengayak biji kopi menggunakan pendekatan simulasi Finite Element Analysis (FEA). Analisis dilakukan untuk mengetahui respons mekanik struktur terhadap pembebanan statis berdasarkan parameter tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan. Model rangka dibuat menggunakan Computer Aided Design (CAD) dengan material ASTM A36 dan dianalisis pada tiga variasi profil hollow, yaitu 40×40×1,8 mm, 35×35×1,8 mm, dan 40×40×2,0 mm. Pembebanan statis sebesar 560 N diberikan berdasarkan total massa komponen mesin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum yang diperoleh berada pada rentang 16,404–17,460 MPa, nilai regangan sebesar 0,000071–0,000121, deformasi sebesar 0,206–0,301 mm, dan faktor keamanan sebesar 4,9–9,1. Seluruh nilai tegangan yang diperoleh masih berada di bawah tegangan luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa sehingga struktur rangka masih berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan yang diberikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi dimensi profil memengaruhi respons mekanik struktur, namun seluruh model yang dianalisis memenuhi kriteria kekuatan dan keamanan berdasarkan parameter tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan.

Kata Kunci *: Finite Element Analysis, kekuatan struktur, rangka mesin, tegangan, faktor keamanan.*

ABSTRACT

This study aims to investigate the structural strength of a coffee bean sieving machine frame using a Finite Element Analysis (FEA) simulation approach. The analysis was conducted to evaluate the structural response under static loading based on stress, strain, deformation, and factor of safety parameters. The frame model was developed using Computer Aided Design (CAD) and analyzed with ASTM A36 material using three hollow profile variations: 40×40×1.8 mm, 35×35×1.8 mm, and 40×40×2.0 mm. A static load of 560 N was applied based on the total weight of the machine components. The simulation results showed maximum stress values ranging from 16.404 to 17.460 MPa, strain values from 0.000071 to 0.000121, deformation values from 0.206 to 0.301 mm, and factors of safety ranging from 4.9 to 9.1. All stress values remained below the ASTM A36 yield strength of 250 MPa, indicating that the frame structure remained within the safe elastic region under the applied load. The study also shows that variations in hollow profile dimensions influence the structural response; however, all analyzed models satisfy the required structural strength and safety criteria based on stress, strain, deformation, and factor of safety parameters.

Keywords *: Finite Element Analysis, structural strength, machine frame, stress, factor of safety.*

© 2026 The Authors. Published by Machinery: Jurnal Teknologi Terapan (Indexed in SINTA)

doi:
https://doi.org/10.36257/machinery.v7i2.12140

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

1 PENDAHULUAN

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan unggulan di Indonesia yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan berperan penting dalam meningkatkan pendapatan masyarakat serta mendukung sektor agroindustri. Setelah proses pengeringan, biji kopi umumnya masih tercampur dengan kulit ari, debu, maupun kotoran lainnya sehingga diperlukan proses pengayakan untuk memperoleh kualitas biji kopi yang lebih baik. Penggunaan mesin pengayak menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi proses pemisahan, mempercepat waktu produksi, dan menghasilkan mutu biji kopi yang lebih seragam dibandingkan pengayakan secara manual [1], [2].

Rangka merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penopang seluruh komponen mesin serta menerima pembebanan selama proses operasi berlangsung. Kekuatan struktur rangka sangat menentukan kestabilan dan keandalan mesin karena kegagalan struktur dapat menyebabkan deformasi berlebih, menurunkan akurasi kerja, bahkan mengakibatkan kerusakan pada komponen lainnya. Oleh karena itu, proses perancangan rangka harus mempertimbangkan distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta faktor keamanan agar struktur mampu bekerja secara aman sesuai dengan karakteristik material yang digunakan. Material baja karbon ASTM A36 banyak digunakan sebagai acuan dalam analisis struktur karena memiliki sifat mekanik yang sesuai untuk aplikasi konstruksi rangka mesin [3], [4].

Perkembangan teknologi *Computer Aided Engineering* (CAE) telah memberikan kemudahan dalam proses evaluasi kekuatan struktur melalui metode Finite Element Analysis (FEA). Metode ini memungkinkan respons struktur terhadap pembebanan dapat diprediksi sebelum proses manufaktur dilakukan sehingga mampu mengurangi biaya pembuatan prototipe serta mempercepat proses pengembangan desain. Parameter yang umum dianalisis meliputi distribusi tegangan (*stress*), regangan (*strain*), deformasi (*displacement*), dan faktor keamanan (*factor of safety*) [5], [6], [7], [8].

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa metode FEA merupakan metode yang efektif untuk mengevaluasi maupun mengoptimalkan desain struktur. Insano dan Rochardjo [9] melakukan optimasi struktur *train nose frame* menggunakan metode FEA dan memperoleh peningkatan performa struktur melalui modifikasi desain. Effendi et al. [10] menganalisis distribusi tegangan pada rangka kendaraan prototipe untuk mengevaluasi keamanan struktur berdasarkan nilai tegangan yang dihasilkan. Berardi et al. [6] menerapkan metode FEA pada struktur elevating work platform untuk memperoleh desain yang lebih optimal, sedangkan Li et al. [7] melakukan optimasi struktur rangka truk berat guna meningkatkan kekuatan sekaligus mengurangi massa konstruksi. Selain itu, penelitian Ulfah et al. [8] dan Sabtu et al. [11]menunjukkan bahwa simulasi FEA mampu memberikan informasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi secara akurat sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kekuatan struktur sebelum proses fabrikasi dilakukan.

Meskipun berbagai penelitian mengenai analisis struktur menggunakan metode FEA telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada struktur kendaraan, rangka industri, maupun mesin pertanian. Tetapi penerapannya pada rangka mesin pengayak biji kopi masih relatif terbatas. Oleh karena itu diperlukan studi untuk mengetahui respons mekanik struktur rangka terhadap pembebanan kerja sehingga dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi kekuatan dan keamanan struktur sebelum proses manufaktur maupun pengoperasian mesin.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi kekuatan rangka mesin pengayak biji kopi menggunakan pendekatan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA). Analisis dilakukan untuk mengetahui respons mekanik struktur terhadap pembebanan statis berdasarkan parameter tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan sehingga dapat diketahui tingkat keamanan struktur rangka terhadap beban kerja yang diberikan.

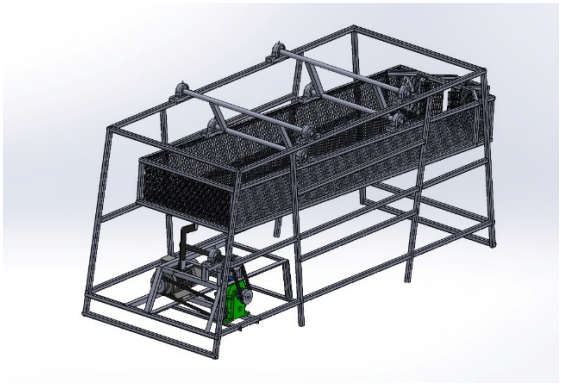
2. BAHAN DAN METODA

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah rangka mesin pengayak biji kopi yang berfungsi sebagai struktur utama penopang seluruh komponen mesin selama proses pengayakan berlangsung. Mesin pengayak digunakan untuk memisahkan biji kopi dari kotoran, kulit ari, dan material asing lainnya setelah proses pengeringan sehingga diperoleh hasil pengayakan yang lebih bersih dan seragam. Rangka mesin dirancang untuk menopang komponen utama yang terdiri atas hopper, ayakan, motor listrik, gearbox, poros, bearing, serta beban biji kopi selama proses operasi.

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

Model rangka dibuat dalam bentuk tiga dimensi (*3D*) menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) berdasarkan dimensi rangka mesin yang telah dibuat sebelumnya. Material rangka diasumsikan menggunakan baja karbon ASTM A36 dengan sifat mekanik yang diperoleh dari standar ASTM A36 dan basis data material pada perangkat lunak simulasi [3], [4]. Berikut gambar desain mesin pengayak biji kopi dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Desain Mesin Pengayak Biji Kopi

Rangka mesin pengayak biji kopi yang berfungsi sebagai penopang seluruh komponen mesin selama proses pengayakan berlangsung. Mesin terdiri atas rangka utama, ayakan, motor penggerak, *hopper*, poros, *bearing*, dan *gearbox*. Analisis difokuskan pada studi kekuatan struktur rangka terhadap pembebanan statis menggunakan pendekatan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA). Parameter yang diamati meliputi tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan sebagai indikator respons mekanik struktur.

2.2 Material Properties

Material rangka dalam penelitian ini diasumsikan menggunakan baja karbon ASTM A36. Pemilihan ASTM A36 dilakukan karena material tersebut banyak digunakan sebagai referensi pada analisis struktur baja dan memiliki sifat mekanik yang sesuai untuk konstruksi rangka mesin [4]. Penelitian ini tidak melakukan pengujian material secara langsung sehingga sifat mekanik material diperoleh dari referensi dan basis data material yang tersedia pada perangkat lunak analisis.

Tabel 1. Sifat Mekanik Material ASTM A36

No	Properti	Nilai
1	Massa Jenis	7850 kg/m³
2	Modulus Elastisitas	200 GPa
3	Rasio Poisson	0,26
4	Tegangan Luluh	250 MPa
5	Kekuatan Tarik Maksumum	400–550 MPa

2.3 Pembebanan dan Kondisi Batas

Pembebanan pada simulasi ditentukan berdasarkan total massa komponen mesin yang terdiri atas motor listrik, hopper, ayakan, poros, *bearing*, *gearbox*, dan biji kopi dengan total massa sebesar 57 kg. Beban kemudian dikonversi menjadi gaya menggunakan persamaan $F = m \times g$, sehingga diperoleh pembebanan statis sebesar 560 N. Gaya diterapkan pada bagian rangka yang menopang komponen mesin, sedangkan kondisi batas (*boundary condition*) diberikan pada titik tumpuan kaki rangka menggunakan fitur *fixed geometry* untuk merepresentasikan kondisi rangka yang terpasang pada lantai. Seluruh variasi profil hollow dianalisis menggunakan kondisi pembebanan dan kondisi batas yang sama agar hasil simulasi dapat dibandingkan secara objektif.

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

2.4 Metode Simulasi

Metode simulasi dilakukan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) pada perangkat lunak CAD. Proses simulasi diawali dengan pemodelan tiga dimensi (*3D*) rangka mesin pengayak biji kopi berdasarkan dimensi hasil identifikasi dan pengukuran. Selanjutnya ditentukan material ASTM A36 sesuai sifat mekanik yang digunakan dalam penelitian. Model kemudian diberikan kondisi batas (*fixed geometry*) pada bagian kaki rangka dan pembebanan statis sebesar 560 N pada titik pembebanan yang mewakili beban komponen mesin. Setelah itu dilakukan proses *meshing* untuk menghasilkan elemen-elemen hingga yang digunakan dalam perhitungan numerik. Simulasi dijalankan untuk memperoleh distribusi tegangan (*von Mises stress*), regangan (*strain*), deformasi (*displacement*), dan faktor keamanan (*factor of safety*). Hasil simulasi dari ketiga variasi profil hollow selanjutnya dibandingkan untuk menentukan profil yang memiliki kinerja struktur paling baik [5], [6], [8], [12].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

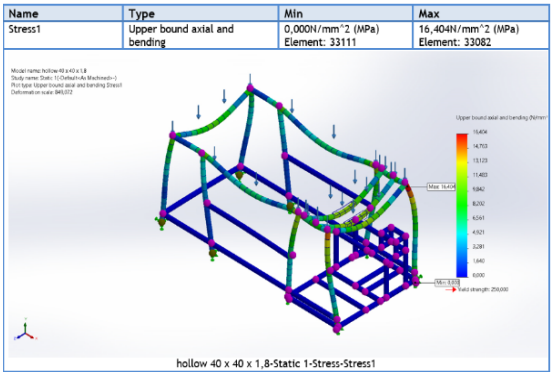
3.1 Hasil Simulasi

Hasil simulasi dari variasi profil hollow 40×40×1,8 mm, 35×35×1,8 mm, dan 40×40×2,0 mm adalah sebagai berikut.

3.1.1 Hasil simulasi hollow 40x40x1,8 mm

1. Tegangan

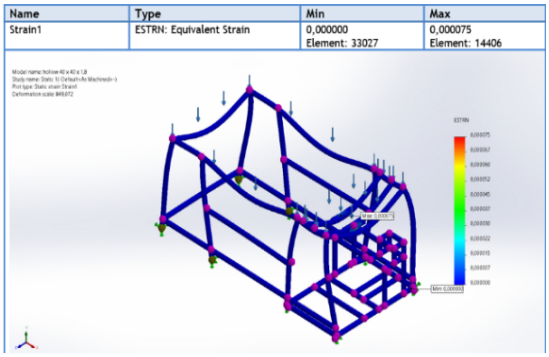
Pada gambar 3 di bawah didapatkan nilai tegangan (stress) dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 16,404 N/ mm2 (MPa).



Gambar 2. Hasil Tegangan Hollow 40×40×1,8 mm

2. Regangan

Pada gambar 4 di bawah didapatkan nilai regangan dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,000075.



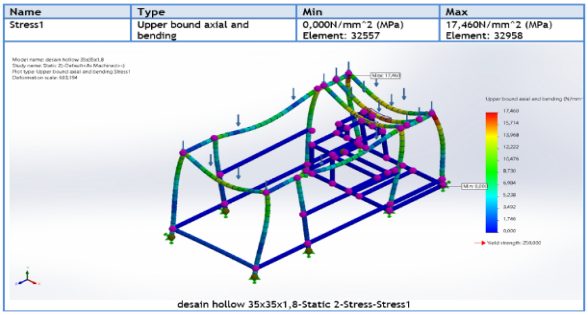
Gambar 3. Hasil Regangan Hollow 40×40×1,8 mm

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

3.1.2 Hasil simulasi hollow 35x35x1,8 mm

1. Tegangan

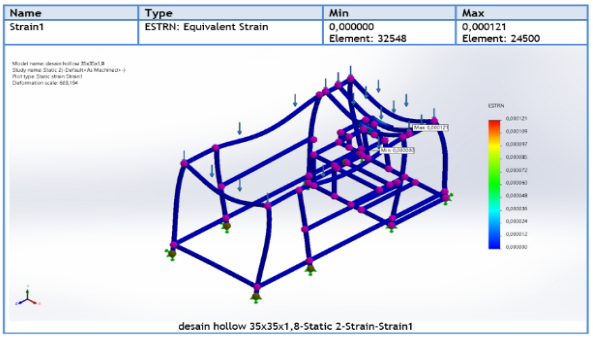
Pada gambar 5 di bawah didapatkan nilai tegangan (stress) dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 17,460 N/ mm2 (Mpa).



Gambar 4. Hasil Tegangan Hollow 35×35×1,8 mm

2. Regangan

Pada gambar 6 di bawah didapatkan nilai regangan dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,000121.

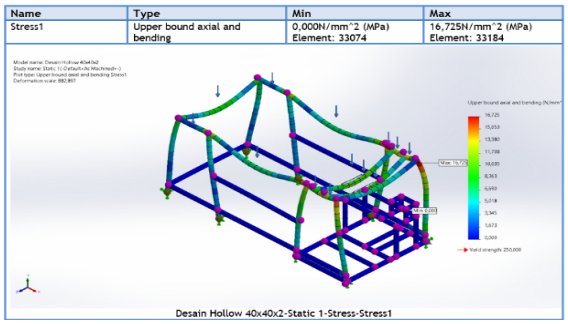


Gambar 5. Hasil Tegangan Hollow 35×35×1,8 mm

3.1.3 Hasil simulasi hollow 40x40x2 mm

1. Tegangan

Pada gambar 7 di bawah didapatkan nilai tegangan (stress) dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 16,725 N/ mm2 (Mpa).

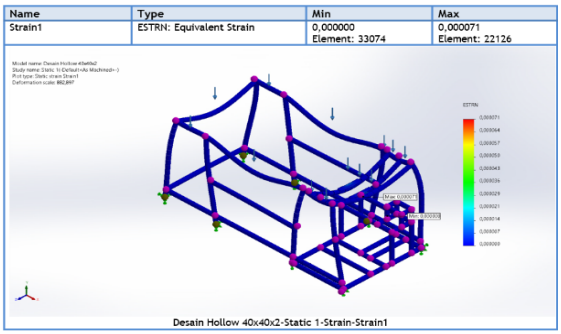


Gambar 6. Hasil Tegangan Hollow 40x40x2 mm

2. Regangan

Pada gambar 8 dibawah didapatkan nilai regangan dengan beban sebesar 560 N, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,000071.

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)



Gambar 7. Hasil Regangan Hollow 40x40x2 mm

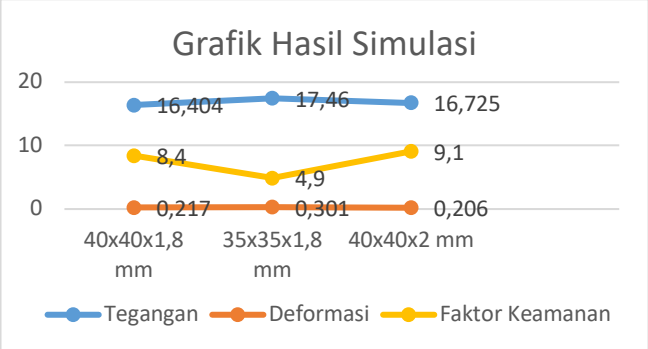
3.2 Hasil Simulasi FEA

Berdasarkan hasil simulasi FEA di atas, diperoleh data keseluruhan hollow yang ada di tabel 2 di bawah sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Simulasi FEA

No	Dimensi Hollow	Tegangan	Regangan	Deformasi	Faktor Keamanan
1	40x40x1,8 mm	16,404 N/mm2	0,000075	0,217 mm	8,4
2	35x35x1,8 mm	17,460 N/ mm2	0,000121	0,301 mm	4,9
3	40x40x2 mm	16,725 N/ mm2	0,000071	0,206 mm	9,1

Berdasarkan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA), variasi dimensi profil *hollow* memberikan respons mekanik yang berbeda terhadap pembebanan statis sebesar 560 N. Perbedaan tersebut ditunjukkan oleh nilai tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan yang dihasilkan pada setiap model. Meskipun demikian, seluruh variasi profil masih menunjukkan perilaku struktur yang aman karena nilai tegangan maksimum yang diperoleh masih berada jauh di bawah tegangan luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur masih bekerja pada daerah elastis sehingga belum mengalami deformasi permanen akibat pembebanan yang diberikan [2], [8].



Gambar 8. Grafik Perbandingan Hasil Simulasi FEA

Gambar 9 memperlihatkan perbandingan hasil simulasi berdasarkan parameter tegangan (*stress*), deformasi (*deformation*), dan faktor keamanan (*factor of safety*) pada setiap variasi profil *hollow*. Secara umum terlihat bahwa perubahan dimensi profil memengaruhi respons mekanik struktur. Variasi profil 35×35×1,8 mm menghasilkan nilai tegangan dan deformasi yang lebih tinggi dibandingkan dua variasi lainnya, sedangkan profil 40×40×2,0 mm menunjukkan faktor keamanan terbesar. Meskipun terdapat perbedaan pada masing-masing parameter, seluruh variasi profil masih berada dalam batas aman terhadap pembebanan statis yang diberikan. Visualisasi grafik ini memperjelas kecenderungan hasil simulasi yang selanjutnya dianalisis berdasarkan setiap parameter mekanik [14].

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

Nilai tegangan maksimum yang diperoleh berada pada rentang 16,404–17,460 MPa. Secara mekanika, tegangan merupakan respons internal material terhadap pembebanan sehingga besarnya dipengaruhi oleh kemampuan penampang dalam mendistribusikan beban. Seluruh nilai tegangan tersebut masih jauh di bawah tegangan luluh (*yield strength*) ASTM A36 sebesar 250 MPa, sehingga struktur diperkirakan masih bekerja pada daerah elastis dan belum mengalami deformasi permanen. Perbedaan nilai tegangan pada setiap variasi profil menunjukkan bahwa perubahan dimensi penampang memengaruhi distribusi tegangan pada struktur. Hasil ini sejalan dengan penelitian Sabtu *et al.* [11] yang menyatakan bahwa perubahan dimensi penampang berpengaruh terhadap distribusi tegangan struktur. Penelitian Li *et al.* [8] juga menunjukkan bahwa karakteristik geometri profil memberikan pengaruh terhadap respons tegangan pada struktur hasil analisis FEA.

Parameter regangan hasil simulasi menunjukkan nilai antara 0,000071–0,000121. Nilai regangan yang relatif kecil mengindikasikan bahwa perubahan bentuk yang terjadi masih berada pada batas elastis material sehingga material diperkirakan mampu kembali ke bentuk semula setelah pembebanan dihilangkan. Selain dipengaruhi oleh sifat mekanik material, besarnya regangan juga berkaitan dengan distribusi tegangan yang terjadi pada struktur. Hasil ini sesuai dengan penelitian Berardi *et al.* [6] yang menjelaskan bahwa analisis FEA dapat digunakan untuk mengevaluasi perilaku elastis struktur melalui distribusi regangan sehingga potensi kegagalan struktur dapat diprediksi sejak tahap perancangan.

Nilai deformasi maksimum yang diperoleh berada pada rentang 0,206–0,301 mm. Deformasi menunjukkan besarnya perpindahan struktur akibat pembebanan sehingga dapat digunakan sebagai indikator kekakuan rangka. Berdasarkan Gambar 9 terlihat bahwa profil 35×35×1,8 mm menghasilkan deformasi terbesar, sedangkan profil 40×40×2,0 mm menghasilkan deformasi terkecil. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan dimensi dan ketebalan profil mampu meningkatkan kekakuan struktur sehingga perpindahan yang terjadi akibat pembebanan menjadi lebih kecil. Namun demikian, seluruh nilai deformasi masih relatif kecil dibandingkan dimensi keseluruhan rangka sehingga tidak diperkirakan memengaruhi fungsi maupun kestabilan mesin selama proses pengayakan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hartono *et al.* [5] yang menunjukkan bahwa deformasi yang rendah merupakan indikator bahwa struktur memiliki kekakuan yang baik dalam mempertahankan bentuk selama menerima pembebanan kerja. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Ulfah *et al.* [8], yang menyatakan bahwa struktur dengan deformasi kecil cenderung memiliki performa mekanik yang lebih stabil selama beroperasi.

Berdasarkan parameter faktor keamanan, seluruh model menghasilkan nilai antara 4,9 hingga 9,1. Faktor keamanan merupakan indikator kemampuan struktur dalam menahan pembebanan sebelum mencapai kondisi kegagalan, sehingga semakin besar nilainya menunjukkan semakin tinggi tingkat keandalan struktur. Nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa struktur memiliki kapasitas yang masih jauh lebih besar dibandingkan beban kerja yang diberikan sehingga risiko kegagalan struktur relatif rendah. Mustaqiem dan Nurato [12] menjelaskan bahwa faktor keamanan yang berada di atas batas minimum menunjukkan bahwa struktur masih memenuhi persyaratan keamanan dalam perancangan mekanik. Selain itu, Berardi *et al.* [6] menyatakan bahwa parameter faktor keamanan merupakan salah satu indikator utama dalam mengevaluasi keandalan struktur hasil simulasi FEA.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi dimensi profil *hollow* memengaruhi respons mekanik struktur berupa tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan. Namun demikian, seluruh model yang dianalisis masih memenuhi persyaratan kekuatan struktur karena nilai tegangan yang terjadi berada di bawah tegangan luluh ASTM A36, deformasi yang relatif kecil, serta faktor keamanan yang berada pada rentang aman. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pendekatan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) mampu memberikan gambaran mengenai perilaku mekanik struktur rangka sebelum proses manufaktur dilakukan, sehingga dapat digunakan sebagai metode evaluasi awal dalam pengembangan desain rangka mesin pengayak biji kopi [5], [6], [15].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi *Finite Element Analysis* (FEA), variasi dimensi profil *hollow* memberikan pengaruh terhadap respons mekanik rangka mesin pengayak biji kopi yang ditinjau dari parameter tegangan, regangan, deformasi, dan faktor keamanan. Nilai tegangan maksimum

ISSN : 2723-3359 (Print)
ISSN : 2776-673X (Online)

yang diperoleh berada pada rentang 16,404–17,460 MPa, regangan sebesar 0,000071–0,000121, deformasi sebesar 0,206–0,301 mm, serta faktor keamanan sebesar 4,9–9,1.

Seluruh nilai tegangan yang dihasilkan masih berada jauh di bawah tegangan luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, sedangkan nilai deformasi yang relatif kecil serta faktor keamanan yang berada di atas batas minimum menunjukkan bahwa seluruh variasi profil *hollow* yang dianalisis masih memenuhi persyaratan kekuatan dan keamanan struktur terhadap pembebanan statis sebesar 560 N.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) mampu memberikan evaluasi awal terhadap perilaku mekanik rangka mesin pengayak biji kopi sebelum proses manufaktur dilakukan. Oleh karena itu, metode ini dapat digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kekuatan struktur serta mendukung pengembangan desain rangka yang lebih efisien pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Fatih, M. Kabib, and A. Z. Hudaya, “Desain dan simulasi mesin sortir biji kopi kering dengan sistem penggerak engkol,” online, 2021.

[2] i. Amin and e. Nurcahyo, “Rancang bangun mesin grinder kopi ditinjau dari segi kekuatan rangka,” 2023.

[3] A. Halim, I. Suryapradana, R. N.S, G. Z.F, and A. P, “Finite element analysis of fermentation frame design for cocoa beans using ASTM A36 material,” *BIS Energy and Engineering*, vol. 2, p. V225008, May 2025, doi: 10.31603/biseeng.347.

[4] ASTM International, "ASTM A36/A36M-97a: Standard Specification for Carbon Structural Steel," West Conshohocken, PA, USA, 1998.

[5] E. Setiawan, A. Zamheri, and Mardiana, “analisa simulasi pada kekuatan material mini boiler menggunakan metode finite element analysis (FEA),” vol. 6, no. 1, p. 2025, 2025, doi: 10.5281/zenodo.15234205.

[6] A. Berardi, C. D. Dellisanti, D. Tarantino, K. S. Leheche Ouette, A. Leone, and A. Tamborrino, “FEA for Optimizing Design and Fabrication of Frame Structure of Elevating Work Platforms,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15137356.

[7] S. Li, X. Yang, J. Wang, Y. Wang, and C. Guo, “finite element analysis and optimization design of the frame of heavy-duty trucks,” *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, vol. 1, no. 20, pp. 40–46, 2025, doi: 10.17683/ijomam/issue20.4.

[8] N. Ulfah *et al.*, “Static Stress Simulation Analysis of Skid Frame of Portable Open Waste Container Using FEA Method on SolidWorks,” *Journal of Engineering Science and Technology Management (JES-TM)*, vol. 5, no. 2, pp. 350–358, Sep. 2025, doi: 10.31004/jestm.v5i2.315.

[9] S. Insano and H. S. B. Rochardjo, “Optimasi Desain Struktur Train Nose Frame dengan Finite Element Analysis,” 2023.

[10] S. Effendi, D. D. Friatinia, D. Arnoldi, and R. D. Jaya, “Design and Stress Analysis of the Prototype Bapro-1 Car Chase,” *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, vol. 3, no. 2, pp. 40–44, Aug. 2023, doi: 10.53893/ijrvocas.v3i2.206.

[11] M. A. Sabtu, A. E. Admi, M. M. Salleh, S. A. Osman, and S. A. Osman, “Finite Element Analysis of Stress Distribution in AL6061 Frame Structures Under Varying Applied Loads,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 259–269, 2024, doi: 10.30880/ijie.2024.16.02.027.

[12] A. D. Mustaqiem and Nurato, “9567-23524-2-PB,” 2020.

[13] A. B. Prasetiyo and K. A. Sekarjati, “Finite Element Simulation of Power Weeder Machine Frame,” *Indonesian Journal of Computing, Engineering and Design (IJoCED)*, vol. 4, no. 2, p. 25, Oct. 2022, doi: 10.35806/ijoced.v4i2.291.

[14] S.W. Wulandari, F. Arifin, and I. Malik, “Optimalisasi desain groove untuk meningkatkan kinerja bushing pada roda bogie berbasis simulasi CFD”, *MACHINERY Jurnal Teknologi Terapan* , vol. 5, no. 3, pp. 140–147, Oktober 2024.

[15] A. Nugraha, *Optimalisasi Desain Sambungan Aluminium Extrusion 2020 Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA). Palembang: UPT Perpustakaan Politeknik Negeri Sriwijaya, 2023. Available: https://eprints.polsri.ac.id/id/eprint/15620/