

Simulasi Kekuatan Rangka Mesin Pengupas Kulit Luar Buah Pala

Bagus Suwandy^{1*}, A Marabdi Siregar², & Chandra A Siregar³

^{1,2,3}. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

*Email: suwandybagus@gmail.com

ABSTRACT

Nutmeg (*Myristica fragrans*) is one of Indonesia's leading plantation commodities with high economic value in the food, pharmaceutical, cosmetic, and spice industries. However, the outer skin peeling process is still predominantly performed manually by small and medium-sized enterprises, resulting in low productivity, inconsistent peeling quality, and high labor intensity. Although several nutmeg peeling machines have been developed, previous studies have mainly focused on functional performance without comprehensive structural evaluation before fabrication. Consequently, the structural reliability of machine frames under operational loading remains insufficiently investigated. This study aims to design a nutmeg outer skin peeling machine capable of simultaneously peeling and separating the fruit skin from the seed while performing a numerical evaluation of the frame structure using the Finite Element Method (FEM). The machine was designed using SolidWorks 2022, followed by a linear static structural analysis employing the Finite Element Method. The simulation considered fixed boundary conditions at the frame supports and static loads of 39.2 N, 68.6 N, and 186.3 N, representing the operational loads acting on the upper frame, middle frame, and motor mounting, respectively. Structural responses were evaluated in terms of Von Mises stress, maximum displacement, and factor of safety. The numerical results showed that the maximum Von Mises stresses were 0.811 MPa, 0.751 MPa, and 5.112 MPa, respectively, while the maximum displacement reached only 1.164 mm. These values remain significantly below the material yield strength of 250 MPa, resulting in a high factor of safety of 48.9, indicating that the frame structure is mechanically safe under static loading conditions. The study demonstrates that the proposed frame design possesses sufficient structural strength and stiffness for nutmeg peeling applications. Nevertheless, the present work is limited to static numerical analysis and does not consider dynamic loading, vibration, fatigue, or weld joint behavior, which should be investigated in future studies.

Keywords: Nutmeg peeling machine; Finite Element Method (FEM); structural analysis; machine frame; numerical evaluation

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil pala (*Myristica fragrans* Houtt.) terbesar di dunia yang memiliki peranan penting dalam perdagangan rempah internasional. Komoditas pala tidak hanya dimanfaatkan sebagai bumbu masakan, tetapi juga menjadi bahan baku industri pangan, farmasi, kosmetik, serta minyak atsiri karena kandungan senyawa bioaktifnya yang bernilai ekonomi tinggi. Tingginya permintaan pasar domestik maupun ekspor terhadap produk pala mendorong perlunya peningkatan kualitas proses pascapanen guna menghasilkan produk yang memiliki mutu tinggi, produktivitas yang lebih baik, serta mampu meningkatkan daya saing industri pengolahan hasil pertanian [1].

Salah satu tahapan penting dalam proses pascapanen pala adalah pengupasan kulit luar buah sebelum dilakukan pemisahan antara daging buah dan bijinya. Pada sebagian besar usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM), proses tersebut masih dilakukan secara manual menggunakan pisau atau alat sederhana. Metode konvensional tersebut memiliki berbagai keterbatasan, antara lain membutuhkan waktu pengerjaan yang relatif lama, kapasitas produksi yang rendah, kualitas hasil pengupasan yang tidak seragam, serta meningkatkan risiko cedera akibat penggunaan alat tajam secara terus-menerus. Kondisi tersebut menjadi salah satu faktor penghambat peningkatan produktivitas industri pengolahan pala, terutama pada sentra produksi yang masih didominasi oleh proses manual [1],[2].

Perkembangan teknologi mekanisasi pertanian telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi proses pengolahan berbagai komoditas perkebunan. Berbagai mesin

pengupas telah dikembangkan untuk komoditas seperti kopi, lada, kacang tanah, kakao, dan pala dengan tujuan meningkatkan kapasitas produksi, memperbaiki kualitas hasil, serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Pemanfaatan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) dalam proses perancangan mesin juga memungkinkan pengembangan desain yang lebih sistematis, akurat, dan mudah dimodifikasi sebelum dilakukan proses manufaktur [2],[3]. Dengan demikian, penerapan teknologi mekanisasi diharapkan mampu meningkatkan efisiensi proses pengolahan pala sekaligus mendukung pengembangan agroindustri yang berdaya saing. Perkembangan teknologi rekayasa mesin dalam satu dekade terakhir menunjukkan bahwa penerapan *Computer-Aided Design* (CAD) yang dipadukan dengan *Computer-Aided Engineering* (CAE) telah menjadi pendekatan utama dalam proses pengembangan mesin pertanian modern. Integrasi kedua teknologi tersebut memungkinkan proses desain, simulasi, dan evaluasi struktur dilakukan secara virtual sebelum tahap fabrikasi sehingga mampu mengurangi biaya pembuatan prototipe, mempercepat proses pengembangan produk, serta meningkatkan keandalan desain. Salah satu metode numerik yang paling luas digunakan dalam evaluasi struktur adalah *Finite Element Method* (FEM), karena mampu memberikan informasi mengenai distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta faktor keamanan pada suatu konstruksi dengan tingkat akurasi yang tinggi [6]. Metode FEM telah diterapkan secara luas pada berbagai bidang rekayasa mekanik, seperti analisis rangka kendaraan, struktur jembatan, komponen mesin, hingga konstruksi mesin pertanian. Dalam bidang perancangan mesin, simulasi FEM memungkinkan perancang mengidentifikasi daerah yang mengalami konsentrasi tegangan (*stress concentration*), mengevaluasi kekakuan struktur, serta memperkirakan potensi kegagalan material sebelum dilakukan proses manufaktur. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses desain, tetapi juga memberikan dasar ilmiah dalam menentukan dimensi struktur, pemilihan material, dan faktor keamanan yang sesuai dengan kondisi operasi [7].

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan keberhasilan penerapan metode FEM dalam mengevaluasi kekuatan struktur mesin pertanian. Soolany et al. [8] melakukan analisis kekuatan rangka mesin pengupas kulit ari kacang tanah menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa tegangan Von Mises maksimum masih berada jauh di bawah kekuatan luluh material sehingga rangka dinyatakan aman digunakan pada kondisi pembebanan statis. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa simulasi numerik mampu mengurangi risiko kesalahan desain sebelum proses fabrikasi dilakukan.

Penelitian serupa dilakukan oleh Dharmanto et al. [9] pada konstruksi rangka mesin pengupas biji nyamplung menggunakan pendekatan *Finite Element Method*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan terbesar terjadi pada lokasi yang menerima pembebanan langsung, sedangkan deformasi maksimum masih berada dalam batas yang diizinkan. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa evaluasi numerik menggunakan FEM merupakan metode yang efektif untuk menilai kekuatan struktur sekaligus meningkatkan efisiensi proses pengembangan mesin sebelum dilakukan pengujian eksperimental.

Selain diaplikasikan pada mesin pertanian, penggunaan FEM juga telah menjadi standar dalam proses desain komponen mekanik sebagaimana dijelaskan oleh Bathe [10]. Analisis numerik memungkinkan perancang mengevaluasi perilaku struktur terhadap berbagai kondisi pembebanan secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan analitik konvensional, terutama pada geometri yang kompleks. Oleh karena itu, integrasi metode FEM dengan perangkat lunak CAD menjadi salah satu pendekatan yang direkomendasikan dalam proses perancangan mesin modern karena mampu menghasilkan desain yang lebih aman, efisien, dan ekonomis.

Meskipun berbagai penelitian mengenai mesin pengupas hasil pertanian telah banyak dilaporkan, sebagian besar masih berorientasi pada peningkatan kapasitas produksi, efisiensi pengupasan, dan kualitas hasil tanpa disertai evaluasi menyeluruh terhadap kekuatan struktur rangka sebelum proses fabrikasi dilakukan. Pada penelitian mengenai mesin pengupas pala, perhatian utama masih difokuskan pada aspek fungsional mesin, sedangkan analisis mekanik terhadap rangka sebagai komponen utama penyangga seluruh sistem belum banyak dibahas secara kuantitatif. Di sisi lain, penelitian yang menerapkan *Finite Element Method* (FEM) umumnya dilakukan pada mesin pengupas komoditas lain, seperti kacang tanah, nyamplung, dan kopi, sehingga karakteristik

pembebanan serta perilaku struktur pada mesin pengupas kulit luar buah pala masih belum terdokumentasi secara memadai [11].

Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu hanya menyajikan hasil distribusi tegangan dan deformasi tanpa menjelaskan secara mendalam mekanisme terjadinya konsentrasi tegangan (*stress concentration*), jalur distribusi beban pada struktur rangka, maupun implikasi nilai Factor of Safety (FoS) terhadap efisiensi desain. Padahal, pemahaman mengenai mekanisme distribusi tegangan sangat diperlukan untuk mengidentifikasi bagian struktur yang berpotensi mengalami kegagalan serta sebagai dasar dalam melakukan optimasi dimensi rangka pada tahap pengembangan berikutnya. Keterbatasan lain yang masih sering dijumpai adalah belum adanya penjelasan mengenai parameter simulasi, seperti jenis elemen, ukuran mesh, jumlah node dan elemen, kondisi kontak (*contact*), serta studi konvergensi (*mesh independence study*), sehingga penelitian menjadi sulit direplikasi oleh peneliti lain [12].

Berdasarkan kondisi tersebut, research gap penelitian ini terletak pada belum tersedianya kajian yang mengintegrasikan proses perancangan tiga dimensi mesin pengupas kulit luar buah pala dengan evaluasi numerik kekuatan rangka menggunakan metode Finite Element Method (FEM) yang dilengkapi dengan parameter simulasi yang terdokumentasi secara sistematis. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi distribusi tegangan Von Mises dan deformasi maksimum, tetapi juga menganalisis mekanisme distribusi tegangan, konsentrasi tegangan pada daerah kritis, serta interpretasi nilai Factor of Safety sebagai indikator tingkat keamanan struktur. Dengan demikian, penelitian ini memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian sebelumnya serta mendukung proses pengambilan keputusan sebelum tahap fabrikasi dilakukan [13].

Novelty penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan Computer-Aided Engineering (CAE) berbasis Finite Element Method untuk mengevaluasi secara numerik kekuatan rangka mesin pengupas kulit luar buah pala yang dirancang menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2022. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang lebih menitikberatkan pada aspek kinerja operasional mesin, penelitian ini menyajikan analisis struktur secara menyeluruh melalui evaluasi tegangan Von Mises, perpindahan (*displacement*), distribusi tegangan pada daerah kritis, interpretasi Factor of Safety, serta penyajian parameter simulasi yang lebih lengkap sehingga dapat meningkatkan reproduktibilitas penelitian. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan mesin pertanian berbasis simulasi numerik yang lebih efisien, aman, dan ekonomis [14].

Berdasarkan latar belakang, kajian pustaka, dan kesenjangan penelitian yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk merancang mesin pengupas kulit luar buah pala yang mampu mengupas sekaligus memisahkan kulit dan biji pala secara lebih efisien. Selain itu, penelitian ini bertujuan melakukan evaluasi numerik terhadap kekuatan struktur rangka menggunakan Finite Element Method (FEM) melalui analisis distribusi tegangan Von Mises, perpindahan maksimum, serta Factor of Safety pada beberapa lokasi pembebanan yang merepresentasikan kondisi operasi mesin. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan desain mesin yang memiliki kekuatan struktur memadai, aman dioperasikan, serta dapat dijadikan referensi bagi penelitian lanjutan yang melibatkan optimasi struktur maupun validasi eksperimental [15].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian rekayasa (*engineering design*) yang meliputi tahapan identifikasi kebutuhan, perancangan, pemodelan tiga dimensi, simulasi numerik, dan evaluasi hasil. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Tahap pertama adalah identifikasi kebutuhan pengguna melalui observasi terhadap proses pengupasan buah pala pada industri kecil. Dari hasil observasi diperoleh informasi mengenai kendala proses pengupasan manual, kapasitas produksi, serta kebutuhan mesin yang mampu mengupas dan memisahkan kulit luar buah pala secara efektif.

Tahap kedua adalah perancangan konsep mesin berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan. Seluruh komponen mesin, meliputi rangka,udukan motor, sistem transmisi, poros, dan mekanisme pengupasan dimodelkan menggunakan perangkat lunak **SolidWorks 2022**. Material rangka dipilih menggunakan besi siku yang umum digunakan pada konstruksi mesin karena memiliki kekuatan mekanik yang baik serta mudah diperoleh.

Tahap ketiga merupakan simulasi kekuatan struktur menggunakan metode **Finite Element Method (FEM)** yang tersedia pada modul **SolidWorks Simulation**. Analisis dilakukan dengan memberikan kondisi batas (*boundary condition*) berupa tumpuan tetap (*fixed geometry*) pada bagian kaki rangka serta pembebanan statis pada bagian atas, bagian tengah, dan dudukan motor sesuai kondisi operasi mesin.

Parameter yang dianalisis meliputi:

1. Tegangan Von Mises (MPa).
2. Perpindahan maksimum (*maximum displacement*) (mm).
3. Distribusi tegangan pada rangka.
4. Evaluasi keamanan struktur berdasarkan hasil simulasi.

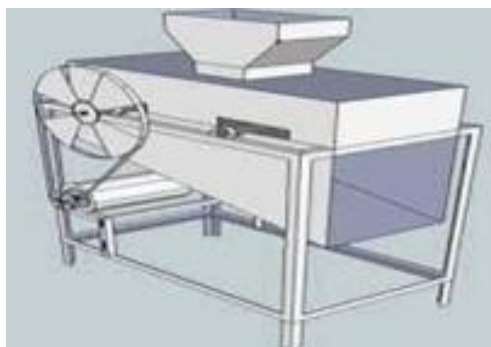
Selanjutnya hasil simulasi dianalisis untuk mengetahui apakah desain rangka mampu menahan beban kerja tanpa mengalami deformasi maupun kegagalan struktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Mesin Pengupas Kulit Luar Buah Pala

Mesin pengupas kulit luar buah pala dirancang menggunakan perangkat lunak **SolidWorks 2022**. Mesin terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu rangka, motor listrik, sistem transmisi sabuk dan puli, poros, mekanisme pengupas, hopper pemasukan, serta saluran keluaran kulit dan biji pala. Seluruh komponen dirancang secara terpadu untuk menghasilkan konstruksi yang sederhana, mudah diproduksi, dan mudah dirawat.

Rangka mesin menggunakan material besi siku karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, biaya relatif rendah, serta mudah diperoleh di pasaran. Material ini juga banyak digunakan pada konstruksi mesin pertanian karena mampu menahan beban statis maupun dinamis selama proses operasi [7].



Gambar 1. Desain tiga dimensi mesin pengupas kulit luar buah pala.

Material Rangka

Material rangka yang digunakan adalah besi siku baja karbon rendah (*mild steel angle bar*). Material tersebut dipilih karena memiliki sifat mekanik yang sesuai untuk konstruksi mesin berukuran kecil hingga menengah.

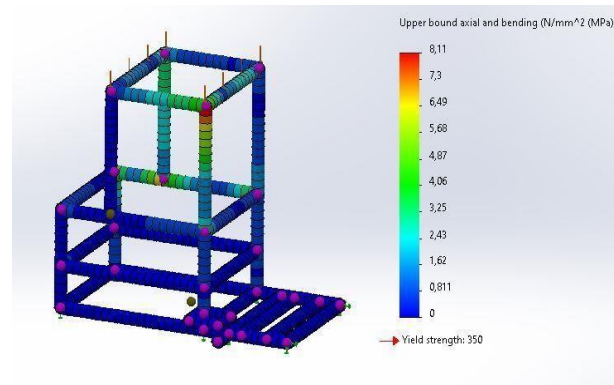
Tabel 1. Sifat Mekanik Material Rangka

Parameter	Nilai
Material	Mild Steel
Modulus Elastisitas	200 GPa
Poisson Ratio	0,30
Massa Jenis	7850 kg/m ³
Yield Strength	250 MPa
Ultimate Tensile Strength	460 MPa

Sifat mekanik tersebut digunakan sebagai parameter pada simulasi **Finite Element Method (FEM)** di SolidWorks Simulation.

Hasil Meshing

Sebelum dilakukan simulasi, model diberikan proses **meshing** agar geometri dapat dibagi menjadi elemen-elemen kecil sehingga proses perhitungan numerik dapat dilakukan. Mesh yang digunakan merupakan **Solid Mesh** dengan ukuran elemen otomatis (*automatic mesh*) sehingga distribusi tegangan dapat dihitung secara lebih akurat.



Gambar 2. Hasil proses meshing pada rangka mesin.

Semakin kecil ukuran elemen mesh maka ketelitian simulasi semakin tinggi, namun waktu komputasi juga semakin besar [8].

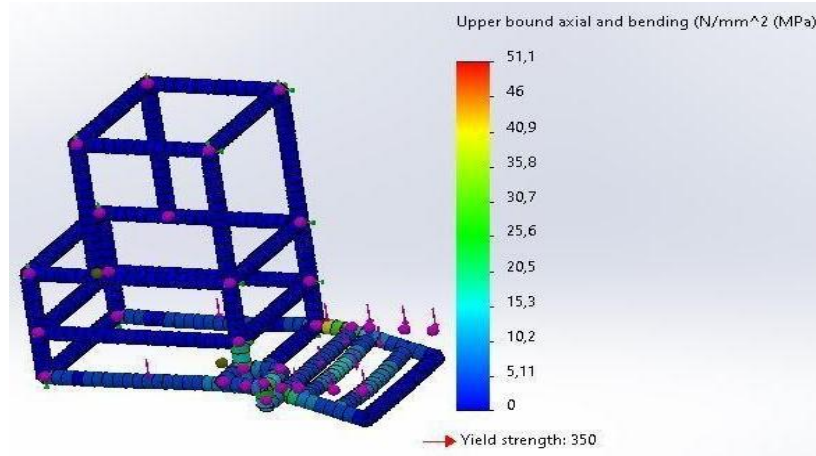
Analisis Tegangan Von Mises

Simulasi dilakukan dengan memberikan pembebanan pada tiga lokasi utama, yaitu bagian atas rangka, bagian tengah, dan dudukan motor.

Tabel 2. Hasil Simulasi Tegangan

Lokasi	Beban (N)	Von Mises (MPa)
Atas	39,2	0,811
Tengah	68,6	0,751
Dudukan Motor	186,3	5,112

Nilai tegangan terbesar terjadi pada dudukan motor yaitu sebesar **5,112 MPa**. Tegangan tersebut masih jauh lebih kecil dibandingkan **yield strength** material sebesar **250 MPa**. Artinya struktur hanya menggunakan sekitar **2%** dari kemampuan maksimum material sehingga masih sangat aman.



Gambar 3. Kontur distribusi Von Mises.

Warna merah menunjukkan daerah dengan tegangan terbesar, sedangkan warna biru menunjukkan daerah dengan tegangan rendah. Konsentrasi tegangan berada padaudukan motor karena lokasi tersebut menerima beban terbesar dari motor penggerak.

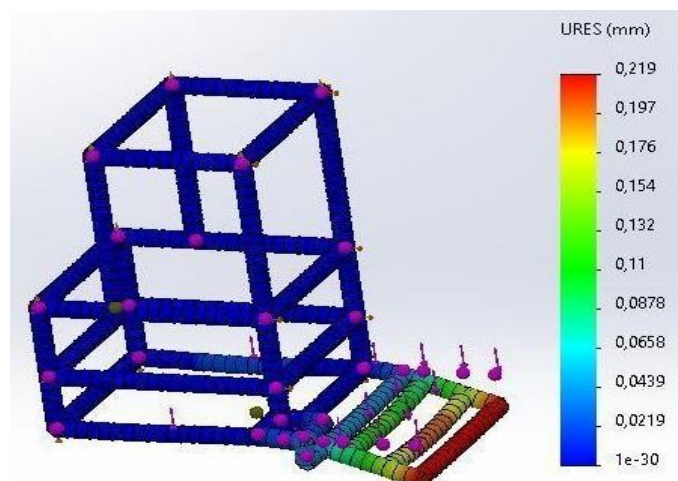
Analisis Displacement

Selain tegangan, simulasi juga menghasilkan nilai perpindahan maksimum (Maximum Displacement).

Tabel 3. Hasil Displacement

Parameter	Nilai
Maximum Displacement	1,164 mm

Nilai perpindahan tersebut masih relatif kecil sehingga tidak menyebabkan perubahan posisi komponen maupun gangguan pada proses pengupasan.

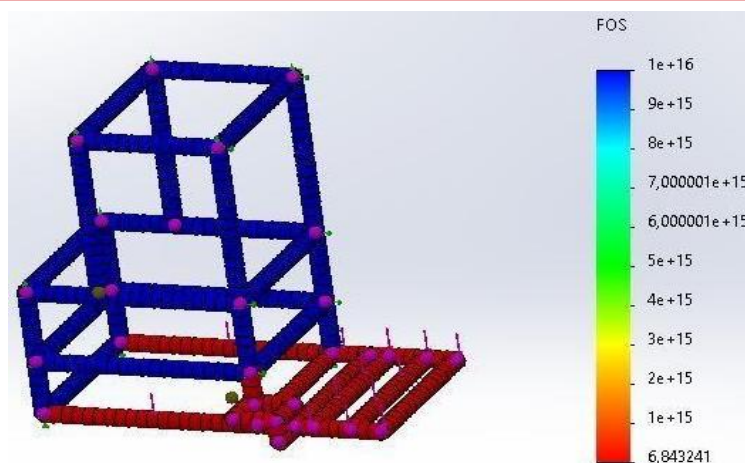


Gambar 4. Kontur displacement rangka.

Daerah dengan perpindahan terbesar berada pada bagian tengah rangka yang tidak langsung ditumpu oleh kaki mesin.

Analisis Faktor Keamanan (Factor of Safety)

Nilai FoS sebesar **48,9** menunjukkan bahwa konstruksi rangka berada jauh di atas batas minimum desain mesin (FoS 2–3), sehingga struktur sangat aman terhadap pembebanan statis.



Gambar 5. Kontur displacement Factor of safety (FoS) dudukan mesin

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu.

Tabel 4. Perbandingan Penelitian

Peneliti	Objek	Metode	Hasil
Soolany et al. (2025) [5]	Mesin pengupas kacang	FEM	Tegangan masih di bawah yield material
Dharmanto et al. (2025) [6]	Mesin pengupas nyamplung	FEM	Struktur aman digunakan
Penelitian ini	Mesin pengupas pala	FEM SolidWorks	Tegangan maksimum 5,112 MPa dan displacement 1,164 mm

Hasil penelitian ini memperlihatkan kecenderungan yang sama dengan penelitian sebelum ini, yaitu lokasi tegangan terbesar selalu berada pada titik pembebanan utama. Namun demikian, nilai tegangan maksimum pada penelitian ini relatif kecil dibandingkan kekuatan luluh material sehingga menunjukkan bahwa desain rangka memiliki kekuatan yang memadai.

Implikasi Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan simulasi **Finite Element Method (FEM)** sebelum proses fabrikasi mampu mengurangi risiko kegagalan desain, mempercepat proses pengembangan produk, serta menekan biaya pembuatan prototipe. Dengan demikian, rancangan mesin ini berpotensi diterapkan pada industri kecil dan menengah sebagai alternatif mekanisasi proses pengupasan buah pala untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi kerja.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan evaluasi numerik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa mesin pengupas kulit luar buah pala berhasil dirancang menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2022 sebagai dasar pengembangan prototipe mesin yang mampu mengupas sekaligus memisahkan kulit buah pala secara mekanis. Hasil analisis menggunakan Finite Element Method (FEM) menunjukkan bahwa tegangan Von Mises maksimum pada bagian atas rangka, bagian tengah, dan dudukan motor masing-masing sebesar 0,811 MPa, 0,751 MPa, dan 5,112 MPa, yang seluruhnya masih jauh di bawah batas luluh (*yield strength*) material sebesar 250 MPa. Selain itu, nilai perpindahan maksimum yang diperoleh hanya sebesar 1,164 mm, sehingga deformasi yang terjadi masih berada dalam batas aman dan tidak memengaruhi kestabilan maupun fungsi struktur rangka. Hasil evaluasi juga menunjukkan bahwa rangka berbahan besi siku baja karbon rendah memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai untuk menahan beban operasi mesin, sehingga secara struktural layak digunakan sebagai konstruksi mesin pengupas kulit luar buah pala. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada evaluasi numerik dengan pembebanan statis, sehingga penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis dinamis, kajian kelelahan

(fatigue), serta validasi eksperimental terhadap prototipe guna memperoleh gambaran kinerja struktur yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pradiva, Y. C., & Desrial. *Rancang Bangun dan Uji Kinerja Alat Pengupas Buah Pala (Myristica fragrans) untuk Industri Rumah Tangga*. IPB University, 2025.
- [2] Getpun, S., & Jeendoug, R. *The Development of Peeling Machine for Nutmeg Sheller*. KKU Research Journal (Graduate Studies), 2023.
- [3] Aninditya, M. W., dkk. *Modifikasi Rancangan Mesin Pengupas Lada Menggunakan Software SolidWorks*. Sultra Journal of Mechanical Engineering, 2024.
- [4] Logan, D. L. *A First Course in the Finite Element Method*. 7th Edition. Cengage Learning, 2022.
- [5] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 11th Edition. McGraw-Hill Education, 2020.
- [6] Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4th ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [7] Rao, S. S. *The Finite Element Method in Engineering*. 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [8] Soolany, C., Abdillah, Y. I., & Suwanto. *Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pengupas Kulit Ari Kacang Tanah Tipe Roller Tunggal Menggunakan Simulasi SolidWorks*. Jurnal Ilmiah Momentum, 2025.
- [9] Dharmanto, A., dkk. *Analysis of the Strength of the Frame Construction on the Nyamplung Bean Peeling Machine Using the Finite Element Method*. TEKNOSAINS, 2025.
- [10] Bathe, K. J. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [11] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Elsevier.
- [12] ASTM International. (2023). *ASTM A36/A36M – Standard Specification for Carbon Structural Steel*.
- [13] Moaveni, S. (2020). *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. 4th ed. Pearson.
- [14] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 11th ed. McGraw-Hill Education.
- [15] Rao, S. S. (2018). *The Finite Element Method in Engineering*. 6th ed. Butterworth-Heinemann.