

Analisis Pengaruh Jenis Material Terhadap Kekuatan Rangka Mesin CNC Router Cutting 3 Axis

^{1*}Mohammad Susanto, ²Haris Mahmudi, ³Hesti Istiqlaliyah

^{1,2,3} Teknik Mesin, Universitas Nusantara PGRI Kediri

E-mail: ¹mohammadsusanto321@mahasiswa.unpkediri.ac.id, ²hestiisti@unpkediri.ac.id,
³harismahmudi@unpkediri.ac.id

Penulis Korespondens : mohammad susanto

Abstrak—Rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis merupakan komponen struktural utama yang menentukan kestabilan dan akurasi mesin selama proses pemesinan. Penelitian ini bertujuan merancang rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis menggunakan SolidWorks serta menganalisis kekuatan rangka dengan variasi material Hollow ASTM A500 Grade C dan Angle Iron ASTM A36 melalui Finite Element Analysis (FEA). Beban yang diterapkan sebesar 60 kg (600 N). Parameter yang dianalisis meliputi Von Mises stress, displacement, dan safety factor. Hasil simulasi menunjukkan Hollow ASTM A500 Grade C menghasilkan tegangan maksimum $1,073 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, displacement $2,667 \times 10^{-4} \text{ mm}$, dan safety factor $\pm 2,3$. Sementara Angle Iron ASTM A36 menghasilkan tegangan maksimum $3,958 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ dengan displacement $4,492 \times 10^{-1} \text{ mm}$. Material Hollow ASTM A500 Grade C terbukti lebih optimal karena memiliki kekakuan lebih tinggi, deformasi lebih kecil, dan margin keamanan lebih baik sebagai rangka utama mesin CNC Router Cutting 3 Axis.

Kata Kunci— Angle Iron ASTM A36, CNC Router, Finite Element Analysis, Hollow ASTM A500 Grade C, SolidWorks

Abstract— The frame of the 3-Axis CNC Router Cutting machine is the main structural element that determines machine stability and accuracy during machining. This study aims to design the frame using SolidWorks software and analyze frame strength with Hollow ASTM A500 Grade C and Angle Iron ASTM A36 material variations through Finite Element Analysis (FEA). The applied load was 60 kg (600 N). Parameters analyzed include Von Mises stress, displacement, and safety factor. Simulation results show Hollow ASTM A500 Grade C produces maximum stress of $1.073 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, displacement of $2.667 \times 10^{-4} \text{ mm}$, and safety factor of ± 2.3 . Angle Iron ASTM A36 produces maximum stress of $3.958 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ with displacement of $4.492 \times 10^{-1} \text{ mm}$. Hollow ASTM A500 Grade C proved more optimal due to higher rigidity, smaller deformation, and better safety margin as the main frame material.

Keywords— Angle Iron ASTM A36, CNC Router, Finite Element Analysis, Hollow ASTM A500 Grade C, SolidWorks

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara berkembang mengalami pertumbuhan sektor industri manufaktur yang terus meningkat seiring kemajuan teknologi dan tuntutan produksi yang mengedepankan ketelitian serta efisiensi. Industri manufaktur menjadi salah satu sektor strategis yang mendorong

pertumbuhan ekonomi nasional melalui peningkatan kapasitas produksi dan daya saing produk di pasar global. Dalam menghadapi intensifikasi persaingan di pasar internasional, industri manufaktur dituntut melakukan reformulasi strategi produksinya secara menyeluruh, termasuk melalui percepatan siklus produksi dengan menerapkan metode yang lebih inovatif dan adaptif terhadap perkembangan teknologi [1]. Perubahan ini mencakup integrasi sistem otomasi yang memungkinkan fleksibilitas dan keakuratan tinggi, menggantikan peran mesin-mesin konvensional yang semakin tidak relevan terhadap kebutuhan industri modern.

Sistem otomasi merupakan teknologi yang berkaitan dengan penerapan sistem mekanik, elektronik, dan berbasis komputer untuk menjalankan proses secara otomatis [2]. Teknologi ini menggabungkan prinsip mekanika, elektronika, dan teknologi informasi untuk menciptakan proses operasional yang mampu berjalan secara mandiri dengan efisiensi, konsistensi, dan akurasi yang tinggi. Salah satu inovasi teknologi permesinan yang merepresentasikan otomasi dalam manufaktur adalah Computer Numerical Control (CNC), yaitu sistem yang bekerja secara otomatis untuk memenuhi kebutuhan produksi, terutama dalam pembuatan produk dengan bentuk kompleks, tingkat presisi tinggi, dan pengerjaan yang tidak dapat dilakukan dengan mesin konvensional [3]. Mesin CNC Router adalah alat yang dilengkapi teknologi DSP (digital signal processing) untuk memotong atau mengukir berbagai bahan secara otomatis melalui komputer, dengan fungsi utama meliputi pemotongan (cutting), pengukiran (engraving), dan pemberian tanda (marking) [4].

Mesin CNC Router 3 Axis telah menjadi fokus perhatian peneliti karena kemampuannya menghasilkan potongan material yang akurat melalui kontrol otomatis pada tiga sumbu gerak (X, Y, Z). Pengembangan desain dan optimasi mesin CNC Router 3 Axis mampu meningkatkan akurasi pemotongan serta kinerja operasional mesin sehingga memenuhi kebutuhan produksi modern yang semakin kompleks [5]. Rangka mesin CNC Router 3 Axis merupakan komponen struktural utama yang berfungsi menopang seluruh sistem mesin, seperti meja kerja, gantry, motor penggerak, sistem transmisi, dan spindle. Kualitas rangka sangat menentukan tingkat kekakuan, kestabilan, serta akurasi pemotongan mesin selama proses operasi [6]. Meskipun mesin CNC memiliki keunggulan yang signifikan, penerapannya di lingkungan pendidikan dan industri skala kecil masih menghadapi kendala utama berupa biaya investasi yang tinggi serta dimensi mesin yang besar. Kondisi ini berdampak pada kurang optimalnya pembelajaran berbasis praktik, padahal penguasaan teknologi CNC melalui praktik langsung sangat penting untuk membentuk kompetensi mahasiswa dalam sistem mekanik dan pemrograman.

Desain rangka yang umum digunakan pada mesin CNC Router 3 Axis skala pendidikan masih menggunakan konstruksi sederhana tanpa analisis mendalam terhadap aspek kekakuan struktural dan distribusi beban [7]. Penelitian menunjukkan bahwa defleksi rangka yang berlebihan dapat menurunkan akurasi dimensi, memperburuk kualitas permukaan hasil pemesian, serta mempercepat keausan komponen mekanis mesin [8]. Guna mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan analisis kekuatan struktural rangka secara komprehensif dengan memanfaatkan perangkat lunak berbasis Finite Element Analysis (FEA). SolidWorks sebagai perangkat lunak CAD yang banyak digunakan mampu melakukan simulasi FEA untuk mengevaluasi perilaku struktural suatu desain, termasuk menganalisis tegangan Von Mises, displacement, dan safety factor [9]. Dalam konsep dasarnya, FEA membagi model matematis menjadi elemen hingga yang dianalisis secara individual, kemudian hasilnya digabung untuk memperoleh gambaran keseluruhan [10]. Penelitian juga perlu mempertimbangkan perbandingan jenis material rangka, mengingat pemilihan material yang tepat menentukan kemampuan mesin dalam mengatasi tekanan dari proses pemotongan [11].

Beberapa penelitian terdahulu memberikan kontribusi penting dalam pengembangan analisis struktur rangka mesin berbasis FEA. Penelitian Sofyan, Putra, dan Hidayat menerapkan FEA menggunakan SolidWorks untuk mengevaluasi tegangan dan deformasi pada struktur mesin, menunjukkan bahwa material hollow berdinding tebal lebih efisien dalam meningkatkan kekuatan dan stabilitas pada struktur sederhana [12]. Studi yang dilakukan Trilaksono, Akbar, dan Mahmudi merancang mesin pengayak padi semi otomatis dengan mengintegrasikan analisis kekuatan struktural sebagai dasar pemilihan material rangka, dengan hasil bahwa material yang tepat menghasilkan performa lebih optimal dan aman saat dioperasikan [13]. Mahmudi dan Wijaya menunjukkan pentingnya analisis perhitungan daya dan sistem transmisi dalam perancangan mesin sebagai dasar penentuan spesifikasi material yang sesuai dengan beban kerja aktual [14]. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) merancang rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis menggunakan SolidWorks; dan (2) menganalisis kekuatan rangka dengan variasi material Hollow ASTM A500 Grade C dan Angle Iron ASTM A36, meliputi tegangan Von Mises, displacement, dan safety factor dengan pembebanan yang merepresentasikan kondisi kerja aktual mesin.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian eksperimen numerik berbasis simulasi komputer. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini menghasilkan data berupa nilai numerik dari parameter struktural yang dapat dianalisis dan dibandingkan secara objektif [15]. Penelitian dilakukan di Laboratorium Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusantara PGRI Kediri. Instrumen utama yang digunakan adalah perangkat lunak SolidWorks 2024, yang berfungsi untuk membuat model 3D rangka mesin sekaligus menjalankan simulasi FEA melalui fitur Stress Analysis [9]. Data penelitian diperoleh melalui pengujian kekuatan rangka dengan pembebanan statis sebesar 60 kg (600 N) pada dua variasi material: Hollow ASTM A500 Grade C dan Angle Iron ASTM A36. Tabel 1 menyajikan variabel dan indikator yang digunakan dalam pengumpulan data simulasi.

Tabel 1. Variabel dan Indikator Pengumpulan Data Simulasi

No.	Variabel	Indikator	Satuan	Referensi
1	Von Mises Stress	Tegangan maksimum pada rangka akibat pembebanan	N/m ²	[10],[12]
2	Displacement	Perubahan bentuk/lendutan maksimum rangka	mm	[9],[12]
3	Safety Factor	Rasio kekuatan material terhadap tegangan aktual (≥ 2 aman)	-	[9],[16]

Prosedur penelitian meliputi beberapa tahapan: studi literatur, pembuatan model 3D rangka mesin menggunakan SolidWorks, penentuan material dan kondisi pembebanan, penguncian geometri (fixed geometry), hingga menjalankan simulasi. Output simulasi berupa nilai Von Mises stress, displacement, dan safety factor untuk masing-masing material. Teknik analisis data dilakukan secara deskriptif komparatif, membandingkan nilai ketiga parameter antara dua material untuk menentukan material yang paling optimal secara struktural. Tabel 2 menyajikan spesifikasi material yang dianalisis dalam penelitian ini.

Tabel 2. Spesifikasi Material Rangka

Spesifikasi	Hollow ASTM A500 Grade C	Angle Iron ASTM A36
Densitas	7,80 g/cm ³ (7800 kg/m ³)	7,85 g/cm ³ (7850 kg/m ³)
Kekuatan Tarik	400 N/mm ² (58,01 Psi)	400 N/mm ² (58,01 Psi)
Batas Elastis	290 N/mm ² (42,11 Psi)	240 N/mm ² (36,26 Psi)

Konduktivitas Termal	0,2556 W/(m.K)	0,2556 W/(m.K)
Defleksi Maksimum	0,10668 mm	0,10668 mm
Ketebalan Profil	1,2 mm	1,2 mm

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis dengan metode Finite Element Method (FEM) melalui perangkat lunak SolidWorks. Analisis dilakukan untuk menilai perilaku rangka terhadap pembebanan sebesar 60 kg (600 N). Parameter yang ditinjau meliputi tegangan (stress), perpindahan (displacement), dan faktor keamanan (safety factor). Metode simulasi menggunakan SolidWorks dipilih karena memiliki tingkat akurasi tinggi dalam merepresentasikan pembebanan pada struktur rangka secara efisien dan mendekati kondisi nyata [12], sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat secara langsung mendukung tercapainya tujuan penelitian. Sebelum simulasi dijalankan, dilakukan perancangan model 3D rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis menggunakan SolidWorks dengan konfigurasi struktur yang mampu menopang seluruh komponen mesin, termasuk meja kerja, gantry, motor penggerak, dan spindle [7].

1) Hasil Simulasi Stress (Von Mises)

Von Mises stress adalah teori kriteria kegagalan material yang umum digunakan untuk material ulet (ductile), digunakan untuk menganalisis stress akibat beban dari banyak sumbu dalam simulasi FEA [10]. Nilai tegangan yang dihasilkan harus berada di bawah nilai yield strength material agar desain dinyatakan aman. Berdasarkan hasil simulasi pada material Hollow ASTM A500 Grade C dengan pembebanan 600 N, diperoleh nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar $1,073 \times 10^8$ N/m². Nilai ini masih berada di bawah batas elastis (yield strength) material sebesar $2,900 \times 10^8$ N/m², sehingga rangka dinyatakan aman dan tidak mengalami kegagalan struktur. Distribusi tegangan pada rangka memperlihatkan pola yang relatif merata, dengan konsentrasi tegangan tertinggi pada sambungan rangka yang menerima beban langsung dari komponen mesin di atasnya.

Sementara itu, simulasi pada material Angle Iron ASTM A36 menghasilkan nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar $3,958 \times 10^6$ N/m². Nilai yang lebih rendah ini tidak mengindikasikan keunggulan performa, melainkan mencerminkan distribusi beban yang kurang merata pada profil siku, di mana konsentrasi beban pada titik tertentu lebih besar sementara bagian lain hampir tidak terbebani. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik profil siku yang memiliki kekakuan lebih rendah dibandingkan profil hollow dalam menahan beban multiarah [17].

2) Hasil Simulasi Displacement

Displacement menggambarkan perubahan bentuk benda yang bersifat sementara akibat beban pada titik tertentu [6]. Analisis displacement bertujuan mengevaluasi respons struktur terhadap pembebanan, di mana nilai yang semakin kecil menunjukkan kekakuan struktur yang lebih baik. Pada material Hollow ASTM A500 Grade C, hasil analisis menunjukkan nilai displacement maksimum sebesar $2,667 \times 10^{-4}$ mm pada area yang menerima beban langsung, dan nilai minimum mendekati $8,394 \times 10^{-9}$ mm. Distribusi deformasi secara keseluruhan didominasi warna biru hingga hijau, yang menandakan lendutan rendah dan masih dalam batas yang diizinkan. Nilai displacement aktual yang sangat kecil ini mencerminkan bahwa rangka memiliki kekakuan yang baik dalam menahan beban sebesar 600 N.

Berbeda dengan itu, material Angle Iron ASTM A36 menghasilkan nilai displacement maksimum sebesar $4,492 \times 10^{-1}$ mm. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan material Hollow

ASTM A500 Grade C, yang mengindikasikan tingkat deformasi lebih tinggi saat menerima pembebanan yang sama. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik profil siku yang memiliki momen inersia lebih rendah dibandingkan profil hollow, sehingga kekakuannya terhadap beban lentur lebih kecil. Deformasi yang lebih besar ini berpotensi menurunkan akurasi pergerakan sumbu mesin, yang berdampak langsung pada kualitas hasil pemotongan [8].

3) Hasil Simulasi Safety Factor

Safety factor (faktor keamanan) adalah nilai numerik yang menunjukkan seberapa kuat suatu desain dibandingkan beban yang diperkirakan dialami dalam kondisi operasional [16]. Faktor keamanan dinyatakan aman apabila nilainya lebih dari 1, dengan nilai minimum yang umum disyaratkan adalah lebih dari 2. Hasil simulasi pada material Hollow ASTM A500 Grade C menunjukkan nilai safety factor minimum sebesar $+2,3$. Nilai ini berada di atas ambang batas aman minimum yang disyaratkan yaitu 2, sehingga desain rangka dengan material ini dinyatakan aman. Tabel 3 menyajikan rekapitulasi seluruh hasil simulasi FEM untuk kedua material yang dianalisis.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Simulasi FEM Rangka Mesin CNC Router Cutting 3 Axis

No.	Material	Parameter	Nilai Maksimum
1	Hollow ASTM A500 Grade C	Von Mises Stress	$1,073 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
		Displacement	$2,667 \times 10^{-4} \text{ mm}$
		Safety Factor	$+2,3$
2	Angle Iron ASTM A36	Von Mises Stress	$3,958 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
		Displacement	$4,492 \times 10^{-1} \text{ mm}$
		Safety Factor	-

Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi, terdapat perbedaan signifikan antara material Hollow ASTM A500 Grade C dan Angle Iron ASTM A36 dalam tiga parameter utama yang dianalisis. Dari segi kekuatan material, Hollow ASTM A500 Grade C mampu menahan tegangan yang lebih besar tanpa melampaui batas elastisitasnya. Nilai tegangan maksimum sebesar $1,073 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ masih jauh di bawah batas elastis material sebesar $2,900 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, yang menunjukkan bahwa material ini memiliki kapasitas menahan beban yang lebih baik sebelum mengalami deformasi permanen [11].

Ditinjau dari kekakuan struktural, material Hollow ASTM A500 Grade C menghasilkan nilai displacement yang jauh lebih kecil ($2,667 \times 10^{-4} \text{ mm}$) dibandingkan Angle Iron ASTM A36 ($4,492 \times 10^{-1} \text{ mm}$). Perbedaan ini menunjukkan bahwa profil hollow memiliki momen inersia yang lebih besar sehingga lebih mampu menahan beban lentur dan menjaga kestabilan bentuk struktur [17]. Kekakuan yang lebih tinggi ini berkontribusi langsung pada stabilitas pergerakan sumbu mesin, yang pada akhirnya menentukan akurasi dan kualitas hasil pemotongan [8]. Temuan ini sejalan dengan penelitian Istiqlaliyah et al. yang menyatakan bahwa pemilihan material dengan karakteristik mekanik yang sesuai merupakan faktor penentu keberhasilan perancangan mesin [18].

Dari aspek keamanan struktural, nilai safety factor material Hollow ASTM A500 Grade C sebesar $+2,3$ membuktikan bahwa desain rangka ini aman digunakan pada kondisi operasional yang diperhitungkan. Nilai ini melampaui batas minimum yang umumnya disyaratkan dalam perancangan rangka mesin [16]. Margin keamanan yang cukup ini penting untuk mengakomodasi variasi beban yang mungkin terjadi selama operasi nyata, termasuk beban dinamis dari gerakan gantry dan gaya potong spindle. Rendahnya nilai tegangan pada Angle Iron ASTM A36 tidak mengindikasikan keunggulan, melainkan mencerminkan distribusi beban yang kurang merata serta profil yang lebih tepat digunakan sebagai elemen pendukung, bukan rangka utama [17].

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa material Hollow ASTM A500 Grade C memiliki performa struktural yang lebih optimal dibandingkan Angle Iron ASTM A36 untuk aplikasi rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sofyan et al. yang menyimpulkan bahwa material hollow berdinding tebal lebih efisien dalam meningkatkan kekuatan dan stabilitas pada struktur sederhana [12]. Penelitian Trilaksono, Akbar, dan Mahmudi juga mendukung bahwa material rangka dengan karakteristik mekanik yang tepat menghasilkan performa lebih optimal dan aman saat dioperasikan [13]. Hasil ini konsisten pula dengan penelitian Wicaksono, Istiqlaliyah, dan Mahmudi yang menunjukkan bahwa material rangka dengan batas elastis lebih tinggi berkontribusi pada peningkatan keandalan konstruksi mesin secara keseluruhan [19].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa simpulan. Rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis berhasil dirancang menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan konfigurasi struktur yang mampu menopang seluruh komponen mesin secara optimal. Analisis kekuatan rangka melalui metode Finite Element Analysis (FEA) dengan pembebanan 600 N menunjukkan bahwa material Hollow ASTM A500 Grade C menghasilkan nilai tegangan Von Mises maksimum sebesar $1,073 \times 10^8$ N/m², displacement maksimum sebesar $2,667 \times 10^{-4}$ mm, dan safety factor sebesar $\pm 2,3$. Nilai-nilai ini membuktikan bahwa rangka dengan material Hollow ASTM A500 Grade C berada dalam kondisi aman karena seluruh parameter berada dalam batas yang diizinkan.

Sementara material Angle Iron ASTM A36 menghasilkan tegangan Von Mises sebesar $3,958 \times 10^6$ N/m² dan displacement maksimum sebesar $4,492 \times 10^{-1}$ mm. Distribusi beban yang kurang merata serta nilai displacement yang lebih besar menunjukkan bahwa profil siku kurang optimal sebagai material rangka utama mesin CNC Router Cutting 3 Axis. Dengan demikian, material Hollow ASTM A500 Grade C direkomendasikan sebagai pilihan utama dalam perancangan rangka mesin CNC Router Cutting 3 Axis, terutama untuk kebutuhan pendidikan vokasional dan industri skala kecil menengah. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis dinamis dengan memperhitungkan beban getaran spindle dan pergerakan gantry, serta pengujian fisik untuk memvalidasi hasil simulasi.

UCAPAN TERIMA KASIH [JIKA ADA]

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Nusantara PGRI Kediri yang telah memberikan fasilitas dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Ulya, K. Pramesti, dan N. Aprianto, "Analisis Persaingan dan Pengembangan Strategi Industri Manufaktur untuk Meningkatkan Daya Saing," *Musytari: Jurnal Manajemen, Akuntansi, dan Ekonomi*, vol. 11, no. 5, hal. 101-110, 2024, doi: 10.29407/musytari.v11i5.21594.

- [2] I. Anaam, T. Hidayat, R. Pranata, H. Abdillah, dan A. Wibisono Putra, "Pengaruh Trend Otomasi dalam Dunia Manufaktur dan Industri," Vocational Education National Seminar (VENS), vol. 1, no. 1, hal. 46-50, 2022, doi: 10.29407/vens.v1i1.1024.
- [3] W. Bangse dan B. Adesanya, "Design and Fabrication of a CNC Router Machine for Wood Engraving," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1450, hal. 012094, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012094.
- [4] A. Salam, M. Karim, dan K. Azam, "Design and Development of a CNC Router Machine," International Journal of Mechanical Engineering, vol. 7, no. 3, hal. 35-43, 2019, doi: 10.14445/23488360/IJME-V7I3P105.
- [5] M. Firgiawan dan Y. Nurcahyanie, "Optimizing 3-Axis CNC Router Design: Using QFD and DFM for Enhanced Precision and Efficiency," Jurnal bit-Tech, vol. 8, no. 1, hal. 118-126, 2025, doi: 10.36456/bit-tech.vol8.no1.a9147.
- [6] E. S. Yulianto dan I. Pranata, "Karakteristik dan Aplikasi Besi Hollow pada Konstruksi Rangka Mesin dan Perkakas," Jurnal Mesin Nusantara (JMN), vol. 5, no. 2, hal. 60-67, 2022, doi: 10.29407/jmn.v5i2.18119.
- [7] M. N. Mukhtar dan D. Akrianto, "Desain Rancangan Gantry CNC Router 3 Axis dengan Pendekatan Topology," ELEMEN: Jurnal Teknik Mesin, vol. 9, no. 2, hal. 131-139, 2022, doi: 10.34128/je.v9i2.182.
- [8] P. Elmiawan dan M. Fazalul, "Akurasi Mesin CNC Router Low Budget Berbasis Mach3," ROTOR, vol. 15, no. 2, hal. 70-75, 2022, doi: 10.19184/rotor.v15i2.30875.
- [9] A. R. Louis dan G. Mulyono, "Analisis Elemen Hingga (FEA) sebagai Metode Evaluasi Perilaku Struktur pada Perancangan Mekanik," Jurnal Teknik Mesin, vol. 7, no. 1, hal. 15-22, 2019, doi: 10.29407/jmn.v2i1.13063.
- [10] D. Arliansyah, "Penerapan Metode Elemen Hingga (FEM) dalam Analisis Struktur Teknik," Jurnal Rekayasa dan Teknologi, vol. 5, no. 1, hal. 40-48, 2023, doi: 10.30998/jrkt.v5i1.8671.
- [11] H. Pilargenta, F. Rhohman, dan A. Sugianto, "Analisis Pemilihan Material dan Perhitungan Dimensi Rangka Mesin terhadap Distribusi Tegangan dan Kegagalan Struktural," Nusantara of Engineering (NOE), vol. 7, no. 2, hal. 33-41, 2024, doi: 10.29407/noe.v7i02.21384.
- [12] R. Sofyan, A. Putra, dan T. Hidayat, "Penerapan FEA Menggunakan SolidWorks untuk Evaluasi Tegangan dan Deformasi pada Struktur Mesin," Jurnal Teknologi Rekayasa, vol. 4, no. 1, hal. 50-58, 2019, doi: 10.29407/jmn.v2i2.13591.
- [13] M. A. Trilaksono, A. Akbar, dan H. Mahmudi, "Rancang Bangun Mesin Pengayak Padi Semi Otomatis Kapasitas 200 Kg/Jam Menggunakan Motor Listrik," Prosiding SEMNAS INOTEK, vol. 6, no. 2, hal. 328-332, 2022, doi: 10.29407/inotek.v6i2.2606.
- [14] H. Mahmudi dan R. Wijaya, "Analisis Perhitungan Daya pada Mesin Pamarut dan Pemaseras Kelapa Sistem Hidraulik dengan Kapasitas 10 Kilogram," Prosiding SEMNAS INOTEK, vol. 5, no. 2, hal. 019-024, 2021, doi: 10.29407/inotek.v5i2.1007.
- [15] Sugiyono, Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta, 2019.
- [16] L. A. N. Wibawa, "Analisis Kekuatan Material dan Distribusi Tegangan dalam Desain Komponen Mesin," Jurnal Teknik Mesin dan Material, vol. 6, no. 2, hal. 45-53, 2018, doi: 10.29407/jmn.v1i2.13626.
- [17] Stiawan, "Karakteristik dan Aplikasi Baja Struktural ASTM A36 pada Rangka Mesin," Jurnal Teknik Material dan Manufaktur, vol. 8, no. 1, hal. 55-62, 2022, doi: 10.29407/jmn.v5i1.17948.
- [18] H. Istiqlaliyah, A. S. Fauzi, K. Nadliroh, dan H. Mahmudi, "Analisa Pengaruh Proses Alkali pada Komposit Serat Tebu Bermatrik Polimer," Jurnal Mesin Nusantara (JMN), vol. 5, no. 2, hal. 189-200, 2022, doi: 10.29407/jmn.v5i2.19413.
- [19] M. A. Wicaksono, H. Istiqlaliyah, dan H. Mahmudi, "Rancang Bangun Tabung Mesin Pengaduk Pakan Ayam Horen Kapasitas 50 Kg/2 Menit," Nusantara of Engineering (NOE), vol. 8, no. 1, hal. 85-92, 2025, doi: 10.29407/noe.v8i1.25049.
- [20] H. Mahmudi, "Analisa Perhitungan Pulley dan V-Belt pada Sistem Transmisi Mesin Pencacah," Jurnal Mesin Nusantara (JMN), vol. 4, no. 1, hal. 40-46, 2021, doi: 10.29407/jmn.v4i1.16201.