

Perancangan Rangka Mesin CNC Router Sebagai Alat Penunjang dalam Pembuatan Pola Cetakan pada Pengecoran Logam Skala Laboratorium

Ressy Noor Rafiq^{1*}, Besse Titing Karmiati², Manty Aldilani Ikaningsih³, Lulu Nurdini⁴,
War An Rosihan⁵

^{1*,2,3,4,5} Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani

*Email: besse.titing@lecture.unjani.ac.id

Abstract

The development of the metal casting industry requires technology capable of producing products with complex shapes and high precision. This study focuses on the design and analysis of the CNC Router machine frame on a laboratory scale to support mold pattern fabrication in metal casting practicals at Jenderal Achmad Yani University. The frame, constructed from aluminum profile 2040 and ABS material, was analyzed using the Finite Element Method (FEM) through SolidWorks Simulation to evaluate stress distribution, safety factor, and total deformation. The simulation results show a maximum Von Mises stress of 0.1771 MPa, a maximum safety factor of 15, and a maximum total deformation of 0.001409 mm. These results indicate that the designed frame possesses excellent strength, rigidity, and stability under operational loads. Therefore, the CNC Router frame is feasible for manufacturing and can support efficient, technology-based metal casting practicals.

Keywords: CNC router, machine frame, metal casting, mold pattern, solidworks simulation

Abstrak

Perkembangan industri pengecoran logam menuntut teknologi yang mampu menghasilkan produk dengan bentuk rumit dan presisi tinggi. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan analisis rangka mesin CNC Router skala laboratorium sebagai alat penunjang pembuatan pola cetakan dalam praktikum pengecoran logam di Universitas Jenderal Achmad Yani. Rangka yang dirancang menggunakan profil aluminium 2040 dan material ABS dianalisis dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) melalui perangkat lunak SolidWorks Simulation untuk mengevaluasi distribusi tegangan, faktor keamanan, dan deformasi total. Hasil simulasi menunjukkan nilai tegangan maksimum Von Mises sebesar 0,1771 MPa, faktor keamanan maksimum sebesar 15, dan deformasi total maksimum sebesar 0,001409 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rangka memiliki kekuatan, kekakuan, dan kestabilan yang sangat baik terhadap beban operasional. Dengan demikian, desain rangka mesin CNC Router ini layak untuk direalisasikan dalam proses manufaktur dan dapat mendukung kegiatan praktikum pengecoran logam yang efisien dan berbasis teknologi.

Kata kunci: CNC router, rangka mesin, pengecoran logam, pola cetakan, simulasi solidworks

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi manufaktur modern menuntut peningkatan efisiensi, presisi, dan kecepatan dalam proses produksi. Salah satu inovasi penting dalam bidang ini penggunaan *Computer Numerical Control* (CNC), yaitu teknik kendali mesin yang dioperasikan secara otomatis berdasarkan data numerik yang terprogram dalam Teknologi CNC telah banyak diterapkan dalam berbagai proses pemesinan seperti pengeboran, pemotongan, dan pengukiran, serta mampu menghasilkan produk dengan akurasi dan reproduktibilitas yang tinggi.

Dalam konteks proses pengecoran logam, salah satu tahapan penting yang menentukan kualitas hasil akhir teknik pembuatan pola cetakan (*pattern making*). Pola berfungsi sebagai acuan bentuk rongga pada cetakan pasir (*moulding sand*), yang kemudian diisi dengan logam cair untuk membentuk produk. Proses pembuatan pola secara manual sering kali menimbulkan permasalahan seperti ketidaktepatan dimensi, waktu pengerjaan yang lama, serta ketergantungan pada keterampilan operator. Akibatnya, kualitas hasil pengecoran menjadi tidak konsisten [1]

Untuk mengatasi hal tersebut, penggunaan mesin CNC *router* sebagai alat bantu dalam pembuatan pola cetakan logam merupakan teknik yang efektif. CNC *router* memiliki kemampuan melakukan proses pemotongan dan pengukiran dengan ketelitian tinggi pada material non-logam seperti kayu, MDF, atau resin, yang umum digunakan dalam pembuatan pola. Mesin ini bekerja dengan tiga sumbu (X, Y, dan Z) yang dikendalikan secara numerik oleh perangkat lunak CAD/CAM, sehingga mampu merealisasikan desain pola dari model 3D dengan akurasi tinggi dan waktu produksi yang lebih efisien [2].

Penelitian terdahulu telah membuktikan potensi CNC *router* dalam mendukung teknik dan penelitian di bidang manufaktur, Penelitian terdahulu melakukan modifikasi struktur rangka dan bahan CNC *mini router* 3 axis untuk meningkatkan kekakuan dan

stabilitas mesin dalam memproses material kayu dan aluminium [3]. Penelitian lainnya merancang mesin CNC Router 3 axis berbasis *ballscrew* guna mengurangi *backlash* dan meningkatkan presisi [4]. Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa ketebalan dan geometri struktur rangka berpengaruh signifikan terhadap nilai defleksi dan stabilitas mesin, di mana variasi ketebalan *square tube* dari 3 mm hingga 1 mm dapat mengubah defleksi hingga dua kali lipat, sehingga diperlukan optimasi desain rangka agar kuat namun tetap efisien secara material [5].

Faktor utama yang menentukan presisi kerja mesin CNC router kekakuan rangka. Rangka berfungsi sebagai penopang seluruh komponen mekanik seperti meja kerja, teknik transmisi, motor *stepper*, dan *spindle*. Ketidakstabilan atau deformasi pada struktur rangka akan menyebabkan ketidaktepatan sumbu, getaran berlebih, serta penurunan kualitas hasil pemotongan. Oleh karena itu, diperlukan perancangan rangka yang memiliki kekakuan, kekuatan, dan kestabilan yang optimal dengan mempertimbangkan beban dinamis selama operasi mesin.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan rangka mesin CNC *router* skala laboratorium sebagai alat penunjang dalam pembuatan pola cetakan logam. Penelitian ini bertujuan untuk merancang struktur rangka mesin CNC router dengan kekakuan dan kestabilan tinggi sesuai kapasitas laboratorium serta melakukan analisis pembebanan dan deformasi rangka menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*).

Dengan adanya mesin CNC *router* skala laboratorium ini, diharapkan dapat menjadi media pembelajaran yang interaktif bagi mahasiswa teknik mesin, sekaligus mendukung penelitian dan pengembangan dalam bidang desain produk, pengecoran logam, serta teknologi manufaktur berbasis otomatisasi.

Mesin CNC *router* memegang peranan penting karena kekakuan, stabilitas, dan

pemilihan material rangka secara langsung memengaruhi akurasi pemotongan, kestabilan posisi spindle dan meja kerja, serta kualitas pola cetakan yang dihasilkan. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa optimasi desain struktur rangka dan pemilihan material yang tepat mampu menurunkan deformasi, meningkatkan kekakuan, dan menjaga presisi mesin CNC skala kecil hingga laboratorium, terutama ketika divalidasi menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Analysis*) [6].

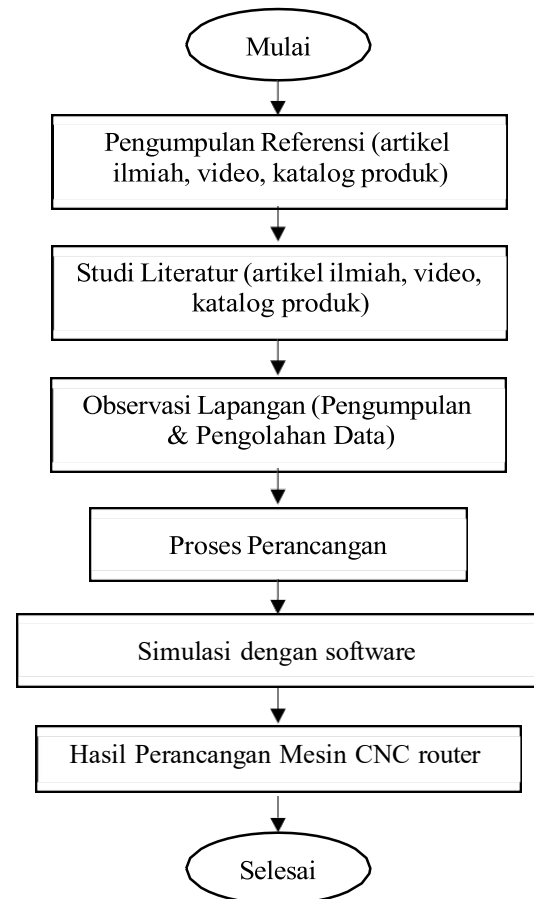
Selain itu, penerapan analisis FEM pada tahap perancangan terbukti efektif dalam mengevaluasi tegangan *Von Mises*, faktor keamanan, dan deformasi total, sehingga rancangan yang dihasilkan tidak hanya kuat secara struktural tetapi juga efisien secara material dan ergonomis untuk penggunaan praktikum [7]. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan rancangan rangka mesin CNC *router* yang presisi, stabil, dan sesuai dengan kapasitas laboratorium, sekaligus berfungsi sebagai media pembelajaran interaktif bagi mahasiswa teknik mesin serta mendukung pengembangan riset di bidang desain produk, pengecoran logam, dan teknologi manufaktur berbasis otomasi.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode perancangan yang bertujuan untuk merancang mesin CNC *router* secara sistematis. Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan referensi dan studi literatur dari artikel ilmiah, buku, video teknis, serta katalog produk untuk memperoleh dasar teoritis dan spesifikasi awal. Selanjutnya dilakukan observasi lapangan guna mengumpulkan dan mengolah data sebagai parameter perancangan. Berdasarkan data tersebut, dilakukan proses perancangan mesin yang mencakup penentuan konsep, pemilihan komponen, serta pembuatan model dan gambar teknik.

Desain yang dihasilkan kemudian dianalisis melalui simulasi menggunakan software untuk mengevaluasi kekuatan dan

kelayakan struktur. Adapun diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan

3. Hasil Penelitian

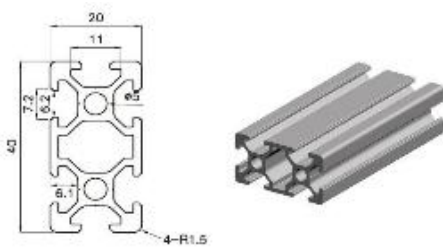
3.1. Hasil Rancangan Bagian Rangka

Bentuk rangka mesin CNC *router* yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada desain rangka tipe gantry berbasis profil aluminium, sebagaimana banyak diterapkan pada mesin CNC skala desktop dan laboratorium. Desain rangka diperoleh melalui studi literatur terhadap desain rangka mesin CNC yang telah ada, kemudian disesuaikan dengan kebutuhan operasional mesin CNC *router* skala laboratorium.

Pemilihan bentuk rangka tersebut didasarkan pada pertimbangan kekakuan struktur, stabilitas posisi spindle dan meja kerja, kemudahan fabrikasi, serta efisiensi

biaya, sehingga rangka mampu mendukung presisi pemotongan dan keandalan operasi mesin. Desain rangka mesin CNC *router* yang dirancang ini merupakan 3 axis yang berbahan dasar aluminium dan *crylonitrile Butadiene Styrene* (ABS).

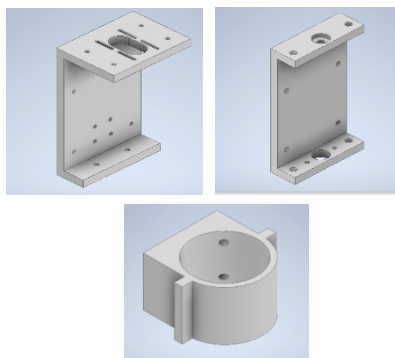
Rangka mesin mini CNC *router* 3 axis ini terbuat dari Aluminium, terdiri 4 batang Aluminium profil T dengan ukuran 2040 dengan tegangan tarik maksimal (σ) = 49,05 N/mm², digunakan sebagai konstruksi komponen sumbu y dan z dengan beban 3.852 kg sesuai gambar 2 [8].



Gambar 2. Aluminium profil T 20

Braket Motor Stepper dan Braket bearing

Bracket motor *stepper* sumbu y dan *bracket bearings* sumbu y menggunakan *plat strip* material ABS [9], sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

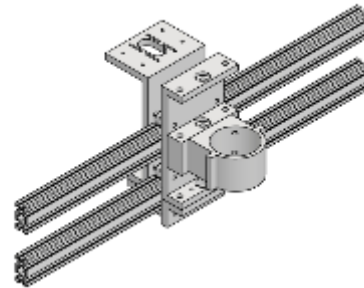


Gambar 3. Bracket motor stepper

Bagian Mekanisme Penggerak Pahat Arah Sumbu x

Bagian Mekanisme penggerak pahat arah sumbu x terbuat dari bahan aluminium profil T 2040 terdiri dari 2 batang dengan dimensi 20 x 40 x 600, yang disusun 2 secara horizontal sebagai jalur (rel) pergerakan pahat kanan atau

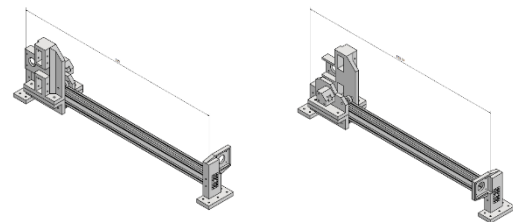
kiri. Rel ini jg ditambahkan *leadscrew* T8-2, 400mm, dilengkapi dengan bearing pillow 608zz sebagai pengunci *leadscrew*, *leadscrew* ini sebanyak 2 buah sebagai penghubung dan pengubah gerak rotasi menjadi gerak linier atau gerakan geser, seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagian Mekanisme Penggerak Pahat Arah sumbu x

Bagian Mekanisme Penggerak Pahat Arah sumbu z

Bagian Mekanisme penggerak pahat arah sumbu z terbuat dari bahan aluminium profil T 2040 terdiri dari 2 batang dengan dimensi 20 x 40 x 600, akan dipasang pada ujung dan tegak lurus terhadap penggerak arah sumbu x sebagai jalur (rel) pergerakan maju mundur pahat, Rel ini jg ditambahkan *leadscrew* T8-2, 500mm (Gambar 6) dilengkapi dengan bearing pillow 608zz (Gambar 5) sebagai pengunci *leadscrew*, *leadscrew* ini sebanyak 2 buah sebagai penghubung dan pengubah gerak rotasi menjadi gerak linier atau gerakan geser seperti pada Gambar 5.



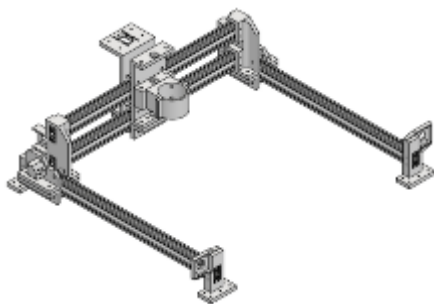
Gambar 5. Bagian Mekanisme Penggerak Pahat Arah sumbu z

Desain Umum Mesin CNC Router 3 Axis

Mesin CNC *router* 3 Axis yang dirancang pada penelitian ini merupakan mesin pemesian berbasis CNC yang digunakan untuk proses pemotongan dan pengukiran material, khususnya material non-logam dan logam ringan seperti kayu, MDF, resin, dan aluminium. Mesin ini dirancang untuk skala laboratorium, sehingga dimensinya disesuaikan dengan keterbatasan ruang, kapasitas daya, serta kebutuhan praktikum dan penelitian di lingkungan akademik.

Secara umum, mesin CNC *router* 3 Axis terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu rangka mesin, sistem gerak linear (axis X, Y, dan Z), sistem *transmisi*, *spindle*, serta sistem kontrol. Rangka mesin berfungsi sebagai struktur utama yang menopang seluruh komponen dan menahan beban kerja selama proses pemesian. Pada penelitian ini, rangka dirancang menggunakan profil aluminium ekstrusi dengan konfigurasi portal (*gantry*) untuk memperoleh keseimbangan antara kekakuan, bobot, dan kemudahan perakitan.

Sistem gerak mesin terdiri dari tiga sumbu linier, yaitu sumbu X sebagai arah gerak meja atau gantry secara longitudinal, sumbu Y sebagai arah gerak transversal, dan sumbu Z sebagai arah gerak vertikal yang membawa *spindle*. Masing-masing sumbu digerakkan menggunakan mekanisme ball screw yang dipadukan dengan motor penggerak untuk menghasilkan pergerakan presisi dengan tingkat *backlash* yang minimal. Gambar desain rangka mesin CNC *router* di tunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangka Mesin CNC router

Prinsip Kerja Mesin CNC Router 3 Axis

Prinsip kerja mesin CNC *router* 3 Axis didasarkan pada pergerakan terkoordinasi tiga sumbu linier (X, Y, dan Z) yang dikendalikan secara numerik oleh sistem kontrol berbasis komputer. Proses pemesian diawali dengan Data hasil pemrosesan CAM selanjutnya dikonversi menjadi kode numerik (G-code) yang berisi perintah gerakan, kecepatan, dan posisi pahat. G-code ini dikirimkan ke sistem kontrol CNC untuk mengatur pergerakan motor pada masing-masing sumbu. Motor penggerak memutar *ball screw*, yang kemudian mengubah gerak rotasi menjadi gerak linier presisi pada sumbu X, Y, dan Z.

Spindle yang terpasang pada sumbu Z berfungsi sebagai pemutar pahat potong dengan kecepatan tinggi. Selama proses pemesian, kombinasi gerakan linier ketiga sumbu dan putaran *spindle* memungkinkan mesin untuk membentuk pola atau kontur sesuai dengan desain digital. Stabilitas dan kekakuan rangka sangat berpengaruh terhadap hasil pemesian, karena *defleksi* yang kecil akan menjaga posisi relatif antara *spindle* dan meja kerja tetap stabil, sehingga presisi pemotongan dapat terjaga.

3.2. Inputan pada SolidWorks

Simulasi kekuatan struktur rangka mesin CNC *router* 3 Axis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) pada perangkat lunak SolidWorks. Simulation dengan parameter input yang mengacu pada Tabel 1 (Properti Material), Tabel 2 (Properti Massa dan Geometri), dan Tabel 3 (Titik Berat).

Tabel 1 memuat properti material rangka berupa aluminium profil ekstrusi tipe T 2040 yang dimodelkan bersifat elastis linier dan homogen, Tabel 2 menyajikan data geometri serta karakteristik massa rangka, sedangkan Tabel 3 menunjukkan posisi titik berat struktur yang digunakan sebagai acuan dalam penentuan pembebanan.

Beban statik sebesar 3,852 kg diaplikasikan pada bagian rangka yang merepresentasikan beban kerja aktual, dengan kondisi batas berupa tumpuan tetap pada kaki rangka. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan distribusi tegangan Von Mises, deformasi total, dan faktor keamanan untuk menilai kekuatan, kekakuan, serta stabilitas struktur sebelum direalisasikan secara fisik

Tabel 1. Properti Material

Parameter	Nilai
Mass Density	1,28 g/cm ³
Yield Strength	57,2 MPa
Ultimate Tensile Strength	114 MPa
Young's Modulus	3,3 GPa
Poisson's Ratio	0,36
Shear Modulus	1,21324 GPa

Tabel 2. Properti Massa & Geometri

Parameter	Nilai
Mass	4,17639 kg
Area	1.273.550 mm ²
Volume	2.832.920 mm ³

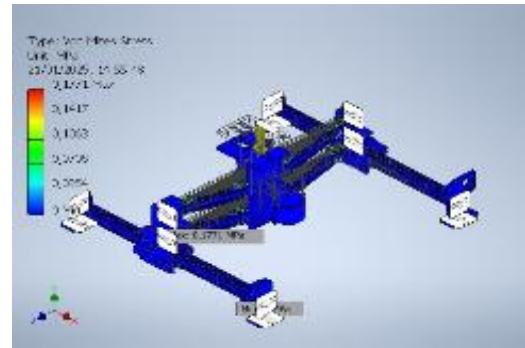
Tabel 3. Center of Gravity (Titik Berat)

Sumbu	Nilai
X	-54,3168 mm
Y	92,716 mm
Z	96,312 mm

3.3. Hasil Simulasi

Analisis tegangan Von Mises

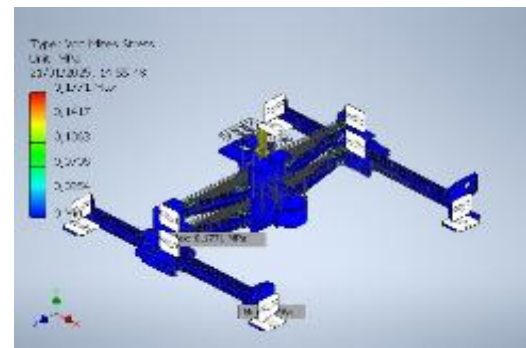
Analisis tegangan *Von Mises* dilakukan melalui simulasi berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan menggunakan perangkat lunak SolidWorks simulation untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada rangka mesin CNC *router* selama menerima beban kerja. Simulasi ini merupakan langkah penting dalam proses perancangan, karena memungkinkan evaluasi kekuatan dan kekakuan struktur tanpa perlu melakukan uji fisik secara langsung.

Gambar 7. Analisis tegangan *Von Mises*

Dengan melakukan simulasi ini, diperoleh gambaran mengenai respons struktur terhadap beban, identifikasi titik-titik kritis, serta verifikasi bahwa rancangan rangka memenuhi persyaratan keamanan dan keandalan mekanik. Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 7.

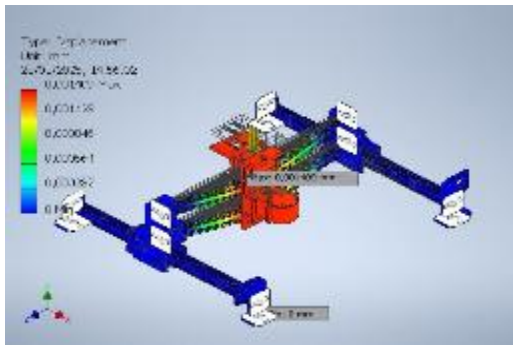
Faktor Keamanan (*Safety Factor Analysis*)

Faktor keamanan untuk memastikan bahwa struktur rangka mesin CNC *router* memiliki tingkat keamanan yang memadai terhadap beban operasional yang diterapkan. Simulasi ini dilakukan menggunakan SolidWorks *simulation* dengan parameter pembebanan dan kondisi batas yang sama seperti pada analisis tegangan. Tujuannya adalah untuk mengetahui seberapa besar margin keamanan yang dimiliki struktur terhadap batas kekuatan material. Hasil pada Gambar 8.

Gambar 8. *Safety Factor*

Simulasi deformasi total

Simulasi deformasi total untuk mengetahui besarnya perpindahan maksimum yang terjadi pada struktur rangka mesin CNC Router akibat beban operasional pada gambar 9. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa defleksi yang terjadi berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, sehingga tidak mempengaruhi presisi gerak dan hasil pemotongan pada proses kerja mesin. Simulasi dilakukan menggunakan SolidWorks Simulation dengan kondisi batas (*boundary condition*) dan beban yang sama seperti pada analisis tegangan *Von Mises* dan faktor keamanan.



Gambar 9. *Displacement*

3.4. Pembahasan

Analisis kekuatan struktur rangka mesin CNC router dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) pada perangkat lunak SolidWorks Simulation. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan *Von Mises*, faktor keamanan, dan deformasi total untuk menilai kekuatan, kekakuan, serta stabilitas struktur terhadap beban kerja [8].

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum *Von Mises* sebesar 0,1771 MPa, jauh di bawah batas kekuatan luluh material baja karbon (250–370 MPa), sehingga struktur dinyatakan aman dari deformasi plastis. Nilai faktor keamanan maksimum mencapai 15, menandakan bahwa rangka memiliki margin keamanan yang sangat tinggi dan mampu menahan beban dengan risiko kegagalan yang sangat kecil [10].

Sementara itu, nilai deformasi maksimum sebesar 0,001409 mm menunjukkan bahwa rangka memiliki kekakuan tinggi dan mampu menjaga kestabilan posisi spindle serta meja kerja, sehingga presisi pemotongan tetap terjaga [11]. Secara keseluruhan, hasil simulasi membuktikan bahwa desain rangka mesin CNC Router memiliki ketahanan mekanis, keamanan, dan kekakuan struktural yang sangat baik, serta layak untuk direalisasikan dalam proses manufaktur dan pengujian lebih lanjut.

4. Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa rangka mesin CNC Router skala laboratorium memiliki kekuatan dan kestabilan yang baik terhadap beban operasional. Nilai tegangan maksimum *Von Mises* sebesar 0,1771 MPa, faktor keamanan maksimum 15, dan deformasi maksimum 0,001409 mm membuktikan bahwa struktur rangka aman, kaku, dan stabil. Dengan demikian, desain rangka berbahan aluminium profil 2040 dan ABS layak untuk direalisasikan sebagai media pendukung praktikum pengecoran logam berbasis teknologi.

6. Daftar Pustaka

- [1] Chan TC, Ullah A, Roy B, Chang SL. Finite element analysis and structure optimization of a gantry - type high - precision machine tool. *Sci Rep* [Internet]. 2023;(0123456789). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40214-5>
- [2] Firgiawan MR, Nurcahyanie YD. Optimizing 3-Axis CNC Router Design : Using QFD and DFM for Enhanced Precision and Efficiency. 2025;8(1).
- [3] Anam, N., & Utama, F. Y. (2025). Pengaruh Variasi Feed Rate Terhadap Akurasi Pemotongan Mesin Cnc Router Portabel 3 Axis Menggunakan Kontrol Mach3 Dan Motor Stepper Nema 23. *Jurnal Teknik Mesin*, 14(03), 81-86.
- [4] Utomo W, Yosevi O. Perancangan Mesin CNC untuk Pengerjaan Logam Aluminium dan Carbon Steel. 2022;14(1):23–9.

- [5] Karmiati, B. T., Ikaningsih, M. A., Rosihan, W. A., Saefudin, D. B., & Pessireron, A. G. (2024). Pengaruh Variasi Ketebalan Square Tube Din 10305-5 Terhadap Defleksi Rangka Plastic Shredder. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 10(1), 13-18.
- [6] Mechanics MC, Vibrations MT. *Manufacturing Automation*. 2026;(January):29–30.
- [7] Tala K. Analysis of the energy efficiency of the shredded wood material densification process. 2017;177:352–7.
- [8] Güler, S., & Karagülle, H. (2016). Finite element analysis of structures with extruded aluminum profiles having complex cross sections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 1499-1514.
- [9] Shaik YP, Naidu NK, Yadavalli VR, Muthyala MR. The Comparison of the Mechanical Characteristics of ABS Using Three Different Plastic Production Techniques. 2023;10.
- [10] Utama DW, Halim A, Primatri G, Amika BA, Immanuel J. Perancangan dan analisis rangka mesin. 2018;16:94–102.
- [11] Krimpenis, A. A., & Iordanidis, D. M. (2023). Design and analysis of a desktop multi-axis hybrid milling-filament extrusion CNC machine tool for non-metallic materials. *Machines*, 11(6), 637.