

Perancangan Rangka Mesin Milling CNC Desktop STT Texmaco Subang

Sutrisno¹, Hary Witjahjo², Sukiyadi³

¹²³Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Texmaco, Indonesia
Email : sutrisno@stttextmaco.ac.id, sukiyadi.ae@gmail.com

Received 31 Agustus 2024 | Revised 14 September 2024 | Accepted 21 September 2024

ABSTRAK

Dalam perancangan mesin milling CNC desktop ini sebagai solusi untuk memudahkan dalam kegiatan praktikum, digunakan software Inventor untuk membuat model 3 dimensinya yang kemudian dilakukan simulasi FEA. Desain rangka mesin mempunyai ukuran 260 X 310 X 255 MM (P x L x T) dengan kapasitas maksimal benda kerja berukuran 100 X 100 X 20 MM (P x L x T). Dari perhitungan nilai maksimal proses permesinan untuk kedalaman potong $a_p=2$ mm, tebal pemakanan $f=0,082$ mm/gigi menghasilkan gaya potong $F_t=122,77$ N dan defleksi $\delta_{(maks_x)}=0,1$ mm. Dari analisa perhitungan manual tegangan maksimal poros eretan sebesar 3,52 MPa sedangkan pada simulasi FEA sebesar 2,086 MPa. Terdapat selisih hasil perhitungan namun keduanya masih dalam batas aman terhadap kekuatan materialnya dan defleksinya sehingga penelitian ini bisa dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Kata kunci: praktikum, milling, gaya potong, fea, defleksi

ABSTRACT

To design a desktop CNC milling machine as a solution to facilitate practical activities, Inventor software was used to create a 3-dimensional model which was then carried out with FEA simulations. The machine frame design has dimensions of 260 X 310 X 255 MM with working material capacity of 100 X 100 X 20 MM. From the calculation, the maximum value of machining proses for cutting depth $a_p=2$ mm, feeding thickness $f=0,082$ mm/tooth produces cutting force $F_t=122,77$ N and deflection $\delta_{(maks_x)}=0,1$ mm. From manual calculation analysis, the maximum stress on the linear shaft is 3.52 MPa, while in the FEA simulation it is 2.086 MPa. There are differences in the calculation results but both are still within safe limits regarding material strength and deflection so this research can be continued to the next stage.

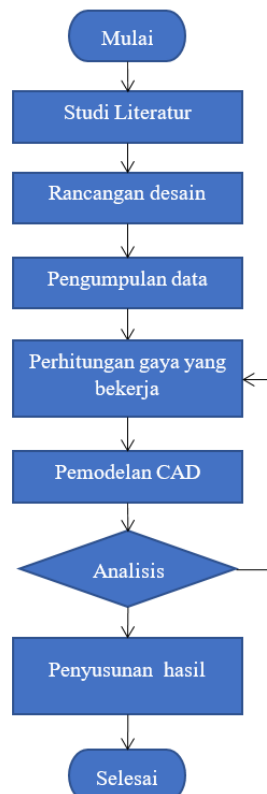
Keywords: practical, milling, cutting force, fea, deflection

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi mesin industri semakin pesat, penggunaan mesin berbasis komputer semakin banyak karena memiliki banyak keuntungan. Mesin CNC (Computer Numerical Control) yang merupakan mesin dengan komputer sebagai pengontrolnya menggunakan bahasa numerik mampu memberikan banyak keuntungan dibandingkan dengan mesin konvensional karena mampu memberikan kecepatan, ketelitian dan kepresisian dalam pengoperasiannya. Perkembangan teknologi CNC tersebut harus diimbangi dengan kesiapan sumber daya manusia yang terampil. Lembaga pendidikan wajib menyediakan mesin CNC sebagai sarana praktik untuk menunjang kemampuan dan keahlian anak didiknya. Namun investasi mesin CNC sangatlah mahal termasuk juga pengoperasian dan perawatannya pun membutuhkan biaya yang tidak murah. Mesin Milling CNC Desktop[1] yang mempunyai ukuran kecil dengan sistem yang sederhana, harga yang murah, perawatan yang mudah serta ketersediaan komponen yang mudah menjadi faktor yang sangat mendukung pengadaan mesin ini. Pembuatan mesin Milling CNC Desktop[2], [3], [4], [5], [6] ini pun dapat dilakukan secara mandiri dengan banyaknya artikel di media internet yang membahasnya. Tentu dalam pembuatannya harus dimulai dari perancangan yang harus dilakukan dengan perhitungan yang benar agar mendapatkan mesin Milling CNC Desktop yang aman digunakan dan sesuai dengan kebutuhan. Tujuan dari penelitian ini adalah menghasikan rancangan mesin Milling CNC Desktop untuk keperluan praktikum dan mengetahui gaya potong maksimum yang dapat ditahan oleh mesin. Desain mesin dikhususkan untuk material lunak seperti aluminium, jenis eretan yang digunakan adalah tipe shaft linear bearing, ulir transportir menggunakan ulir segi empat, material rangka menggunakan plat aluminium. Kemudian dalam perhitungannya sambungan, batu dan mur diasumsikan aman.

2. METODE

2.1 Alur Proses



Gambar 1. Alur Proses

2.2 Rancangan Desain

Beberapa hal yang menjadi faktor yang menentukan dalam proses perancangan adalah sebagai berikut:

- Fungsi dari mesin CNC.
- Ketersediaan komponen di pasaran.
- Kemudahan dalam pemeliharaan dan perbaikan.
- Ukuran mesin sekecil mungkin sehingga tidak memerlukan area yang luas.
- Ukuran maksimal benda kerja.
- Ukuran alat potong / *endmill*.
- Penentuan jarak lintasan eretan.
- Kekuatan dalam menahan beban tegangan yang mempengaruhi hasil produk.
- Penentuan toleransi hasil produk

Tabel 1. Spesifikasi Awal Rancangan Mesin

Deskripsi	Keterangan
Ukuran maksimal benda kerja	100 X 100 X 20 mm (PXLXT)
Toleransi dimensi hasil produk	0.1 mm
Diameter maksimal <i>endmill</i>	10 mm
Ketebalan penyayatan maksimal	0.02 – 0.1mm
Kedalaman penyayatan maksimal	0.5 – 2 mm
Material benda kerja	Aluminium / Plastik

2.3 Data Penelitian

Tabel 2. Data komponen

Komponen	Material	Keterangan	Tensile strength, yield (Mpa)	Tensile strength, ultimate (Mpa)	Modulus young (Gpa)
Benda kerja	Aluminium	100 X 100 X 20 mm (PXLXT)	276	310	68.9
Alat potong	Carbide	Ø10 mm			
Rangka	Aluminium	Tebal 15 mm	276	310	68.9
Eretan	S45C	Ø20 mm	343	564	205
Poros ulir transportir	SS304	SQ12X2	215	505	193
Mur ulir transportir	Brass UNS C23000	SQ12X2	69	207	115

Tabel 3. Data Berat Komponen

	Komponen	Berat (kg)	Total berat (kg)	Efek tegangan
Elemen Sumbu X	Motor <i>Spindle</i>	4.100	8.645 (10 kg)	Tegangan lentur pada poros eretan sumbu X dan beban pada tumpuannya
	Motor Eretan Z	1.200		
	Poros eretan Z	0.774		
	Ulr transportir	0.108		
	Mur transportir	0.062		
	Klem <i>Spindle</i>	0.476		

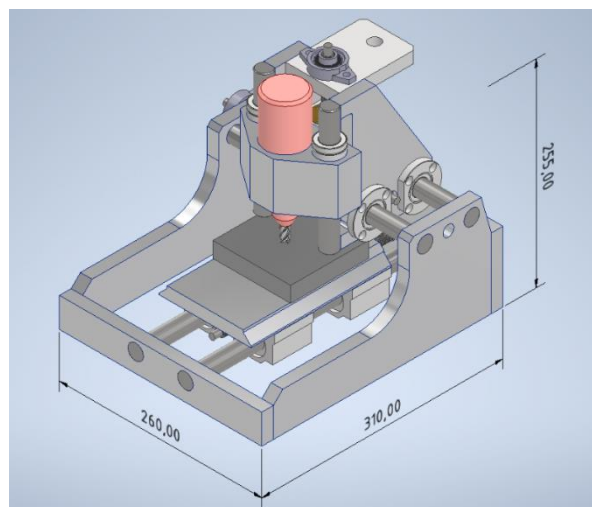
	<i>Pillow block bearing</i>	0.087		
	Rangka	0.978		
	<i>Linear bearing</i>	0.720		
	Baut klem	0.140		
Elemen Sumbu Y	Benda kerja	0.540	4.663 (6 kg)	Tegangan lentur pada poros eretan sumbu Y dan beban pada tumpuannya
	Ragum	0.500		
	Meja	0.829		
	Poros eretan Y	1.530		
	<i>Linear bearing</i>	1.020		
	Mur transportir	0.062		
	Baut klem	0.182		
Elemen Sumbu Z	Motor <i>Spindle</i>	4.100	5.498 (7 kg)	Tegangan lentur pada poros eretan sumbu X dan beban pada tumpuannya
	Klem <i>Spindle</i>	0.476		
	Mur transportir	0.062		
	<i>Linear bearing</i>	0.720		
	Baut klem	0.140		

2.4 Peralatan

Dalam penelitian ini untuk mendesain model panulis menggunakan komputer desain yang terpasang aplikasi *Inventor* untuk menggambar model 3-dimensi yang kemudian dilakukan analisa FEA (*Finite Element Analysis*)[7] untuk mengetahui kekuatan hasil perancangan yang meliputi kekuatan terhadap beban lentur dan defleksinya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perancangan



Gambar 2. Hasil Rancangan mesin

Tabel 4. Spesifikasi Mesin

Deskripsi	Keterangan
Ukuran maksimal benda kerja	100 X 100 X 20 mm (PXLXT)
Toleransi dimensi hasil produk	0.1 mm
Diameter maksimal <i>endmill</i>	10 mm
Ketebalan penyayatan maksimal	0.02 – 0.1mm
Kedalaman penyayatan maksimal	0.5 – 1 mm
Material benda kerja	Aluminium / Plastik

3.2 Hasil Pembahasan

Tabel 5. Hasil Pembahasan Gaya Potong [8]

$F_t = \sigma \times A \times Z_c \times E_f \times T_f \rightarrow A = a_p \times f$		
a_p (mm)	F (mm/gigi)	F_t (N)
0,5	0,02	7,502
0,5	0,05	18,755
0,5	0,1	37,51
1	0,02	15,004
1	0,05	37,51
1	0,1	75,02
2	0,02	30,008
2	0,05	75,02
2	0,1	150,04

Tabel 6. Hasil Pembahasan Tegangan yang Terjadi

Tegangan pada rangka				
Jenis material	Aluminium 6061-T6[9]			Satuan
<i>Yield strength</i> (N/mm ²)	τ_y	276		Mpa
Gaya potong untuk pengujian	F_t	150,04	75,02	N/mm ²
Tegangan pada tumpuan (N/mm²)	$\tau_{geser} = \frac{F}{A}$			
-Elemen sumbu X	τ_{g_x}	0,62	0,62	N/mm ²
-Elemen sumbu Y	τ_{g_y}	0,87	0,87	N/mm ²
-Elemen sumbu Z	τ_{g_z}	0,17	0,17	N/mm ²
Tegangan lentur rangka	$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I}$			
-Elemen sumbu X	σ_{b_rx}	4,57	2,285	N/mm ²
-Elemen sumbu Y	σ_{b_ry}	2,7	1,35	N/mm ²
-Elemen sumbu Z	σ_{b_rz}	5,58	2,79	N/mm ²

Tegangan pada poros eretan				
Jenis material	Baja S45C[10]			
Yield strength (N/mm ²)	τ_y	343		Mpa
Tegangan lentur karena gaya berat F_{w_x} (\downarrow)	$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I}$			
-Elemen sumbu X	σ_{b_pwx}	3,83	3,83	N/mm ²
-Elemen sumbu Y	σ_{b_pwy}	2,76	2,76	N/mm ²
Tegangan lentur karena gaya potong F_t (\leftrightarrow)	$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I}$			
-Elemen sumbu X	σ_{b_pwx}	5,85	2,925	N/mm ²
-Elemen sumbu Y	σ_{b_pwy}	7,04	3,52	N/mm ²
-Elemen sumbu Z	σ_{b_pwz}	3,46	1,73	N/mm ²
Tegangan pada ulir transportir (Baut & Mur)				
Jenis material	SS-304[11] Kuningan (<i>Brass</i> UNS C22000)[12]			
Yield strength (N/mm ²)	τ_y	69		Mpa
Tegangan tarik [13]	$\sigma_{t,k,xy} = \frac{F_t}{\pi(d_l^2 - d_k^2)}$			
-Tegangan tarik (mur sumbu X,Y)	$\sigma_{t,k,xy}$	0,265	0,133	N/mm ²
-Tegangan tarik (mur sumbu Z)	$\sigma_{t,k,xy}$	0,121	0,121	N/mm ²
Tegangan geser	$\tau_{f,xy} = \frac{F_t}{\pi \cdot D \cdot t} \mid \tau_{u,xy} = \frac{2 \cdot F_t}{\pi \cdot d_k \cdot p \cdot n}$			
-Tegangan geser <i>flange</i> (mur sumbu X,Y)	$\tau_{f,xy}$	0,531	0,266	N/mm ²
-Tegangan geser <i>flange</i> (mur sumbu Z)	$\tau_{f,z}$	0,243	0,243	N/mm ²
-tegangan geser ulir (mur sumbu X,Y)	$\tau_{u,xy}$	0,332	0,166	N/mm ²
-tegangan geser ulir (mur sumbu Z)	$\tau_{u,z}$	0,152	0,152	N/mm ²
Beban <i>buckling</i> kritis [14]	$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2}$			
-Ulir transportir sumbu X	P_{cr_x}	14,317	14,317	kN
-Ulir transportir sumbu Y	P_{cr_y}	8,852	8,852	kN
-Ulir transportir sumbu Z	P_{cr_z}	37,268	37,268	kN
Tegangan <i>buckling</i> kritis [14]	$\sigma_b = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2}$			
-Ulir transportir sumbu X	σ_{bcr_x}	126,59	126,59	N/mm ²
-Ulir transportir sumbu Y	σ_{bcr_y}	78,27	78,27	N/mm ²
-Ulir transportir sumbu Z	σ_{bcr_z}	329,784	329,784	N/mm ²

Tabel 7. Hasil Pembahasan Defleksi[15]

Tabel Defleksi (mm)			
		gaya potong yang bekerja F_t	
Gaya potong untuk pengujian		150,04 N/mm ²	75,02 N/mm ²
Defleksi rangka		$\delta_{max} = \frac{P.L^3}{46.E.I}$	
-Elemen sumbu X	δ_{arah_x1}	0,043	0,021
-Elemen sumbu Y	δ_{arah_y1}	0,026	0,013
-Elemen sumbu Z	δ_{arah_x2}	0,052	0,026
Defleksi poros eretan karena gaya berat $F_w (\downarrow)$		$\delta_{max} = \frac{P.L^3}{46.E.I}$	
-Elemen sumbu X	δ_{arah_z1}	0,009	0,009
-Elemen sumbu Y	δ_{arah_z2}	0,01	0,01
Defleksi poros eretan karena gaya potong $F_t (\leftrightarrow)$		$\delta_{max} = \frac{P.L^3}{46.E.I}$	
-Elemen sumbu X	δ_{arah_y2}	0,014	0,007
-Elemen sumbu Y	δ_{arah_x3}	0,025	0,012
-Elemen sumbu Z	δ_{arah_xy}	0,003	0,002
Total defleksi			
-Elemen sumbu X	δ_{maks_x}	0,122	0,061
-Elemen sumbu Y	δ_{maks_y}	0,043	0,022
-Elemen sumbu Z	δ_{maks_z}	0,001	0,001

Pada perhitungan defeksi dengan gaya potong $F_t = 150,04 N$ menunjukkan defleksi pada sumbu X sebesar $\delta_{maks_x} = 0,122 mm$ melebihi batas toleransi yang di tentukan yaitu sebesar $\delta_{maks} = 0,1 mm$. Sehingga perlu dilakukan perhitungan untuk mencari gaya potong maksimal yang di ijinakan.

Tabel 8. Defeksi Pada Tiap Komponen Untuk Mencapai Defleksi Maksimal sebesar $\delta_{maks} = 0,1 mm$

Elemen	Defleksi (mm) untuk $\delta_{maks_x} = 0,12221288$	Faktor pengali (x)	Deleksi (mm) untuk $\delta_{maks_x} = 0,1$
δ_{arah_x1}	0.04247452	0.81824436	0.03475454
δ_{arah_x2}	0.05185843		0.04243286
δ_{arah_x3}	0.02492058		0.02039113
δ_{arah_xy}	0.00295935		0.00242147
δ_{maks_x}	0.12221288		0.1

Menghitung besar gaya potong yang menghasilkan defleksi lebih kecil atau sama dengan 0,1 mm. Sebagai acuan nilai x disubstitusikan ke dalam persamaan defleksi $\delta_{arah_{x2}} = 0,04243286 \text{ mm}$ sebagai berikut:

$$\delta_{arah_{x2}} = \frac{1/2 \times F_t \times 120^3}{3 \times 68900 \times 12093,75}$$

$$F_t = \frac{\delta_{arah_{x2}} \times 3 \times 68900 \times 12093,75}{1/2 \times 120^3}$$

$$F_t = \frac{0,04243286 \times 3 \times 68900 \times 12093,75}{1/2 \times 120^3}$$

$$F_t = 122,76936946 \text{ N}$$

$$F_t = 122,77 \text{ N}$$

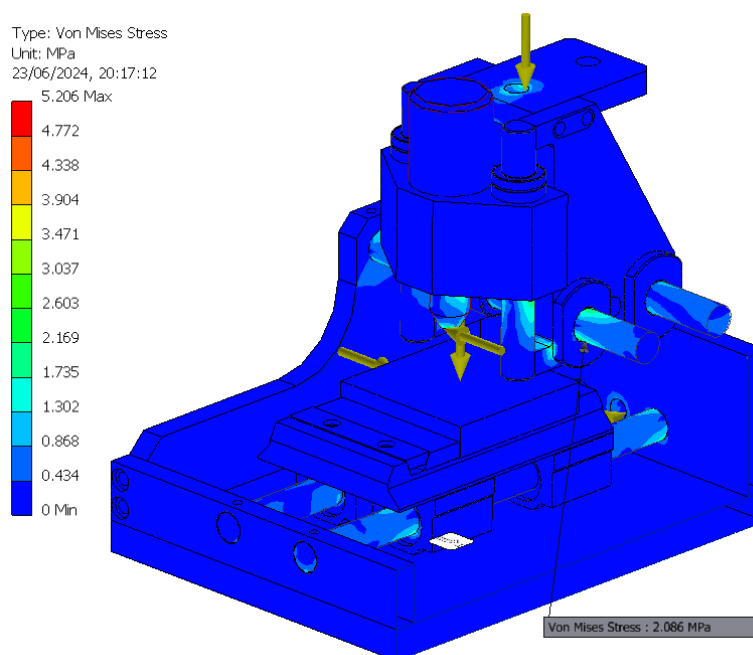
Menghitung kedalaman potong (a_p) dan feeding (f), dengan asumsi kedalaman potong $a_p = 2 \text{ mm}$ maka nilai tebal pemakanan (f) dapat dihitung sebagai berikut:

$$f = \frac{F_t}{\sigma \times a_p \times f \times Z_c \times E_f \times T_f}$$

$$f = 0,082 \text{ mm/gigi}$$

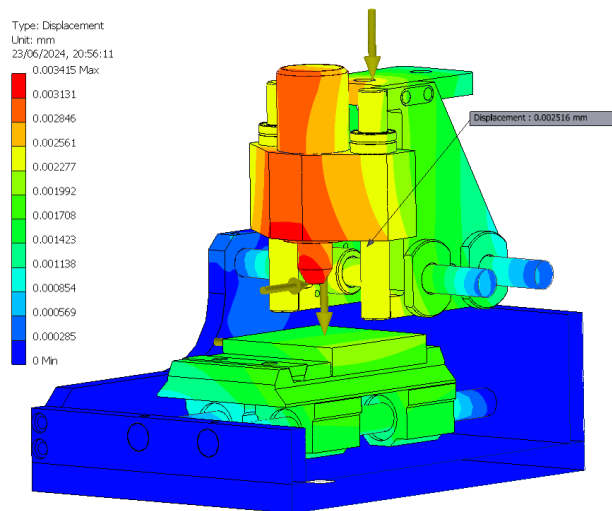
Dari perhitungan ini kita dapatkan nilai maksimal proses permesinan untuk kedalaman potong $a_p = 2 \text{ mm}$, tebal pemakanan $f = 0,082 \text{ mm/gigi}$ menghasilkan gaya potong $F_t = 122,77 \text{ N}$ dan defleksi $\delta_{maks_x} = 0,1 \text{ mm}$.

3.3 Hasil FEA

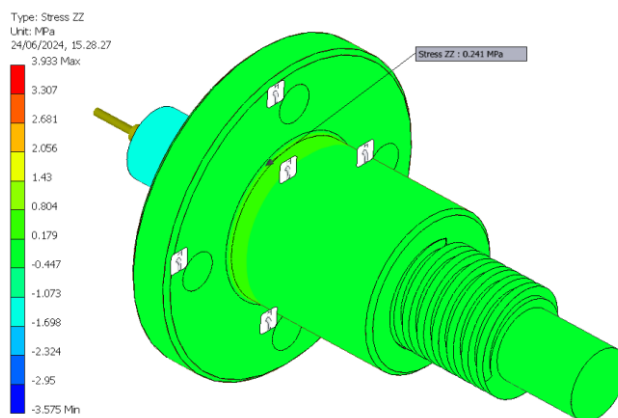


Gambar 3. FEA pada poros eretan X

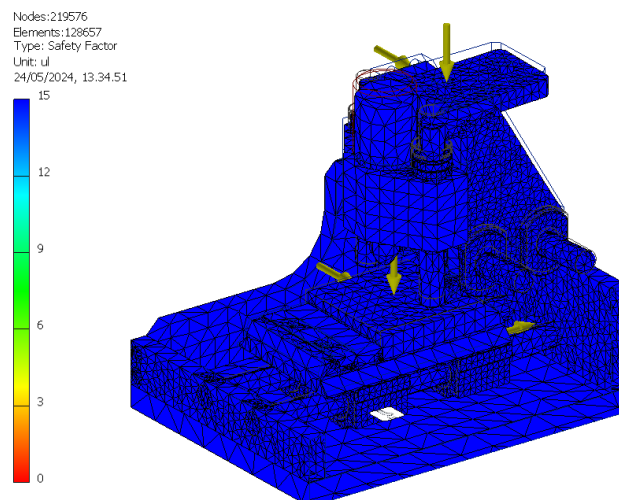
Perancangan Rangka Mesin Milling CNC Desktop



Gambar 4. FEA defleksi maksimal pada arah X



Gambar 5. FEA pada Tegangan geser flange



Gambar 6. Safety factor pada rangka

Tabel 9. Perbandingan hasil Perhitungan manual dan FEA

No.	Elemen yang dihitung (diambil hasil maksimal)	Hasil manual	Hasil FEA	Keterangan
1.	Tegangan rangka X	2,29 MPa	1,141 MPa	Kondisi dirakit dengan $F_t = 75,02 N$.
2.	Tegangan rangka Y	1,35 MPa	1,062 MPa	
3.	Tegangan rangka Z	2,79 MPa	1,483 MPa	
4.	Tegangan poros eretan X	2,93 MPa	2,086 MPa	
5.	Tegangan poros eretan Y	3,52 MPa	1,417 MPa	
6.	Tegangan poros eretan Z	1,73 MPa	1,505 MPa	
7.	Tegangan geser <i>flange</i> X,Y	0,266 MPa	0,241 MPa	Perhitungan terpisah
8.	Defleksi total arah X	0,061 mm	0,003 mm	Kondisi dirakit dengan $F_t = 75,02 N$.
9.	Defleksi total arah Y	0,022 mm	0,0025 mm	
10.	Defleksi total arah Z	0,001 mm	0,001 mm	

Terdapat perbedaan hasil penghitungan secara manual dengan simulasi FEA. Ini dikarenakan beberapa faktor sebagai berikut:

- Dalam perhitungannya FEA memperhitungkan detail setiap bentuk model seperti adanya lubang, alur, tekukan, *chamfer*, *fillet* dan bentuk – bentuk lain yang tidak diperhitungkan saat melakukan perhitungan secara manual.
- Dalam keadaan komponen dirakit secara utuh struktur rangka akan semakin kuat dan metode FEA menghitung seluruh komponen yang terhubung secara menyeluruh sehingga akan mendapatkan hasil yang lebih akurat. Sementara untuk melakukan perhitungan manual pada rangka yang telah dirakit akan membutuhkan perhitungan yang sangat kompleks dan berdampak terhadap kesalahan perhitungan yang besar.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil rancangan mesin sesuai gambar 4.1 dengan ukuran 260 X 310 X 255 sangat cocok untuk menunjang kegiatan praktikum. Dengan bentuk yang sederhana serta ketersediaan komponen yang banyak terdapat di toko *online*, proses pembuatan mesin, pemeliharaan dan perbaikan dapat dilakukan dengan mudah.
- Hasil Analisa menunjukkan gaya potong maksimal yang diizinkan $F_t = 122,77 N$ menghasilkan defleksi sebesar $\delta_{maks_x} = 0,1 mm$, dengan kedalaman potong $a_p = 2 mm$, tebal pemakanan $f = 0,082 mm/gigi$.
- Dari hasil perhitungan manual dan FEA terdapat selisih hasil perhitungan namun keduanya masih dalam batas aman terhadap kekuatan materialnya dan defleksinya sehingga tahapan penelitian ini bisa dilanjutkan ke tahap berikutnya.
- Dari proses penelitian ini penulis semakin dapat memahami perhitungan analisa gaya beban dan tegangan serta proses desain sebuah mesin dan proses analisa dengan FEA.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] "Bantam Tools – Bantam Tools." Accessed: Jun. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.bantamtools.com/>
- [2] K. Ma'arif *et al.*, "RANCANG BANGUN MESIN CNC ROUTER," p. 2021, 2021, Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: <https://jurnal.politeknikbosowa.ac.id/index.php/TMT/article/viewFile/246/102>
- [3] A. Salam, M. Iswar, M. Rifaldi, S. Malik, and K. Putra, "Rancang Bangun Mesin CNC Router Mini Untuk Pembelajaran Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 17, no. 2, p. 150, May 2020, doi: 10.31963/SINERGI.V17I2.2077.
- [4] A. Azmi and C. Ramdhan Nugraha, "RANCANG DAN BANGUN MESIN CNC BERBASIS GBRL KONTROLER DESIGN AND BUILD BASED GBRL CNC MACHINE CONTROLLER." Ekaputri Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, 2018.
- [5] G. E. Pramono, D. Yuliaji, R. Waluyo, and J. Jaenal, "Rancang Bangun CNC Mini Router 3 Axis untuk Keperluan Praktikum CAD/CAM," *AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 1, no. 1, pp. 6–14, 2015, Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: <https://ejournal.uika-bogor.ac.id/index.php/ame/article/download/102/99>
- [6] NRP. 2114 030 068 WAHYU ABDI WIBOWO, "RANCANG BANGUN WOODWORKING CNC MACHINE (WCM) 3 AXIS (X, Y, DAN Z) MENGGUNAKAN MOTOR STEPPER MACH3 PC BASE", Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: https://repository.its.ac.id/47406/1/2114030068-Non_Degree.pdf
- [7] <https://www.autodesk.com>, "Finite Element Analysis (FEA) Software | Autodesk." Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/simulation/finite-element-analysis>
- [8] "Understanding tangential cutting force when milling | Cutting Tool Engineering." Accessed: Dec. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.ctemag.com/news/articles/understanding-tangential-cutting-force-when-milling>
- [9] "MaterialData_Aluminum 6061-T6", Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1863HbOKt-rEpsI8fwn_yWDRLvbi0d85Y/view?usp=drive_link
- [10] "MaterialData_Carbon Steel S45C", Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1cJnDwQEwo0CxaTajsIRB4WwRfUImBfU1/view?usp=drive_link
- [11] "MaterialData_Stainless Steel 304", Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>
- [12] "MaterialData_Bronze, UNS C22000 (90-10 Bronze), OSO50", Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available:

<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bf3eb7415f5d451f9e344c5e923a050b>

- [13] Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, "Buku Mekanika dan Elemen Mesin 2." Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://sumberbelajar.seamolec.org/Media/Dokumen/597425f33f6dc50f3561554e/b8ebc49069c4cd0888dbdd824d36d3a9.pdf>
- [14] "Theory | C5.1 Euler's Buckling Formula | Solid Mechanics II." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <http://www.engineeringcorecourses.com/solidmechanics2/C5-buckling/C5.1-eulers-buckling-formula/theory/>
- [15] Russell C. Hibbeler, *10th Edition_Mechanics of Materials (Russell C. Hibbeler)*, 10th Edition.