

Perancangan Dan Analisa *Spindel CNC Milling Desktop*

Adang Saepudin¹, Sutrisno², Danang Anasa Raharja³

¹²³Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Texmaco, Indonesia

Email : adangsaepudin@gmail.com

Received 17 Februari 2025 | Revised 3 Maret 2025 | Accepted 10 Maret 2025

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan karena dalam pengoperasian permesinan CNC sangat penting memperhatikan hubungan antara material yang digunakan, daya Spindel dan cutting parameter yang digunakan yang mempengaruhi kualitas, efisiensi pengerjaan dan lifetime dari pada Spindel. Hasil dari penelitian ini selanjutnya akan digunakan sebagai salah satu acuan dasar dalam rancang bangun mesin CNC desktop. Pada penelitian ini parameter yang digunakan sebagai pembandingan hasil yaitu Perhitungan Manual dan FEA yang mencakup *Von-Mises stress*, *Displacement*, *Safety factor*. Hasil Defleksi material aluminium 6061. Dari penelitian diambil dengan beberapa gaya potong dan cutting parameter. Diambil sampel terbesar dari Gaya potong sebesar $F_t = 150.04$ N pada poros motor Spindel berdaya 0.8kW, 1.2kW, 2.2kW. Defleksi tersebut diambil dengan $A_p = 2$ mm dan $f = 0.05$ mm/gigi. Dari perhitungan defleksi ditemukan bahwa *Cutting Force* yang dihasilkan dari *Cutting* parameter yang digunakan juga tidak semua bisa digunakan di 3(tiga) sampel Spindel terdapat batasannya yakni dari *Depth of Cut* atau A_p 0.5mm, 1mm, 2mm serta Wide of Cut atau A_e 0.01mm, 0.02mm, 0.05mm.

Kata kunci: Spindel, Cutting Parameter, Gaya Potong, Defleksi, Cutting Force

ABSTRACT

This research was conducted because in the operation of CNC machining it is very important to pay attention to the relationship between the material used, the Spindle power and the cutting parameters used which affect the quality, efficiency of workmanship and lifetime of the Spindle. The results of this study will then be used as one of the basic references in the design of desktop CNC machines. In this study, the parameters used as a comparison of the results are Manual Calculation and FEA which include Von-Mises stress, Displacement, Safety factor. Deflection results of aluminum material 6061. From the study taken with several cutting forces and cutting parameters. The largest sample was taken from the Cutting force of $F_t = 150.04$ N on the Spindle motor shaft with a power of 0.8kW, 1.2kW, 2.2kW. The deflection was taken with $A_p = 2$ mm and $f = 0.05$ mm / tooth. From the deflection calculation, it was found that the Cutting Force generated from the Cutting parameters used could not all be used in the 3 (three) Spindel samples. There are limitations, namely the Depth of Cut or A_p 0.5mm, 1mm, 2mm and the Width of Cut or A_e 0.01mm, 0.02mm, 0.05mm.

Keywords: Spindel, Cutting Parameter, Cutting Force, Deflection, Cutting Force

1. PENDAHULUAN

Perancangan sebuah mesin tentu harus menghitung beban gaya-gaya yang bekerja pada tiap sisi mesin tersebut. Pada mesin CNC milling perhitungan gaya potong menjadi sangat penting untuk menentukan analisa komponen lainnya. Ini dikarenakan gaya potong tersebut adalah gaya yang beraksi pada alat potong dan benda kerja secara langsung. Semua komponen harus mampu menahan gaya aksi yang disebarkan oleh gaya potong tersebut untuk menjamin proses pemotongan atau penyayatan alat potong terhadap benda kerja berjalan dengan baik sehingga menghasilkan produk yang baik.

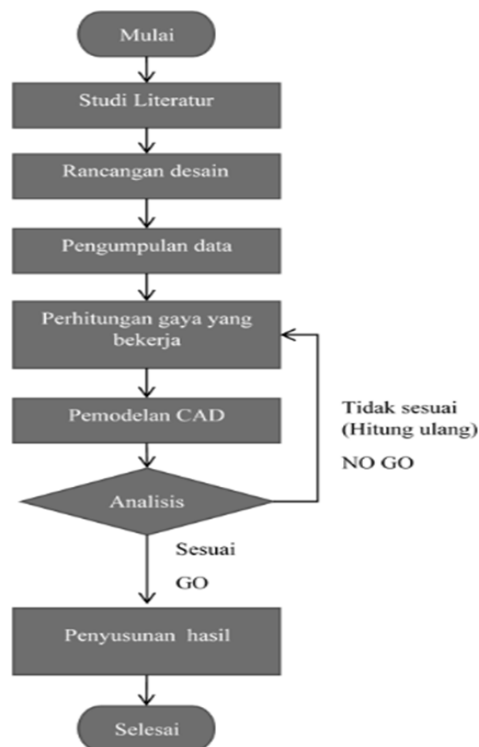
Dengan menentukan diameter alat potong, kedalaman pemotongan, lebar pemotongan, putaran alat potong dan daya motor spindel maka dapat ditentukan spesifikasi dari tiap-tiap komponen mesin milling CNC Desktop yang akan dirancang. Dari hal tersebut dapat kita ketahui Gaya potong, Inersia, Tegangan lentur, Defleksi, Gaya Potong Spesifik dan Daya Potong pada spindel nya.

2. METODE

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai perancangan spindel sesuai dengan material yang akan dikerjakan Perancangan dimulai dari perencanaan material apa yang akan digunakan dan cutting parameter yang sesuai dengan kebutuhan. Perancangan dan analisis dapat dibagi menjadi dua tahap, tahap pertama adalah pengumpulan data dan perhitungan. Yang kedua adalah analisis data dan rekomendasi. Diagram alir digunakan selama pemilihan dan analisis data material dan cutting parameter.

2.1 Prosedur Penelitian

Metode Penelitian terdiri dari beberapa tahap dan digambarkan dalam gambar berikut :



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian

2.2 Perencanaan dan Pengumpulan data

Dalam perencanaan penelitian, penulis menentukan spesifikasi yang dapat digunakan untuk 3(tiga) karakter spindel yaitu sebagai berikut:

Toleransi dimensi hasil produk : 0.1 mm
 Diameter maksimal endmill : 10 mm
 Ketebalan penyayatan maksimal : 0.01 – 0.05 mm
 Kedalaman penyayatan maksimal : 0.5 – 1 mm
 Material benda kerja : Aluminium 6061-T1

Untuk spesifikasi material yang dipilih untuk perhitungan ini adalah sebagai berikut:

Material : Aluminium 6061-T1
 Diameter endmill : 10 mm
 Tebal pemakanan (ae) : 0.01 – 0.05 mm
 Kedalaman pemakanan (ap) : 0.5 – 1 mm
 kekuatan tarik : 310 MPa
 kekuatan luluh : 276 MPa
 modulus elastis : 68.9 GPa

Spesifikasi alat potong adalah sebagai berikut:

Jenis : Endmill
 Material : Carbide
 Diameter : 10 mm
 Jumlah gigi : 4

Spesifikasi material dari poros spindel yang digunakan:

Material : AISI 1060 Steel
 Density (g/cc) : 7.87
 Tensile Strength (MPa) : 1025
 Yield Strength (MPa) : 677
 Modulus Elasticity (GPa) : 200
 Diameter poros (mm) : 8, 14, 23

2.3 Persamaan yang digunakan

Pada penelitian ini penulis menggunakan beberapa persamaan yang tentunya menentukan hasil dari penelitian ini, adapapun persamaan itu sebagai berikut:

Gaya potong tangensial

$$F_t = \sigma \times A \times Z_c \times E_f \times T_f \quad (1)$$

$$A = a_p \times f \quad (2)$$

Tegangan lentur

$$\sigma_b = \frac{M.y}{I} ; \quad M_{max} = \frac{1}{4} P.L \quad (3)$$

Inersia

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4 \quad (4)$$

Defleksi poros

$$\delta_{max} = \frac{P.L^3}{46.E.I} \quad (5)$$

Gaya potong spesifik

$$KC = KC1 . HM^{-MC} \quad (6)$$

Daya potong

$$P_C = \frac{ap.f.Vc.KC}{60.10^3.\eta} \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah memaparkan hal yang melatarbelakangi penelitian, Pada bab ini akan diuraikan mengenai hasil pengujian serta pembahasan yang relevan.

3.1 Hasil Analisis Cutting Power

Pengujian ini menghitung gaya potong tangensial yang bekerja terhadap Cutting Parameter pada spindel 0.8kW adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Cutting parameter pada spindel 0.8 kW

aP (mm)	f (mm/min)	Vc (Mpa)	Kc (N/mm)	k -Ketetapan	η- Efisiensi (%)	Cutting Power (kW)
0.5	0.01	800	2529.8	60.10 ³	90%	0.187
0.5	0.02	800	2127.3	60.10 ³	90%	0.315
0.5	0.05	800	1691.8	60.10 ³	90%	0.627
1	0.01	800	2529.8	60.10 ³	90%	0.375
1	0.02	800	2127.3	60.10 ³	90%	0.630
1	0.05	800	1691.8	60.10 ³	90%	1.253 X
2	0.01	800	2529.8	60.10 ³	90%	0.750 X
2	0.02	800	2127.3	60.10 ³	90%	1.261 X
2	0.05	800	1691.8	60.10 ³	90%	2.506 X

Pada Tabel 1 diatas dapat dilihat bahwa pada beberapa Cutting Parameter memiliki Cutting Power yang melenihi 90% dari daya spindel 0.8kW ditandai dengan (X)silang, ini menunjukkan bahwa cutting parameter tersebut tidak direkomendasikan.

Pengujian ini menghitung gaya potong tangensial yang bekerja terhadap Cutting Parameter pada spindel 1.2kW adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Cutting parameter pada spindel 1.2 kW

aP (mm)	f (mm/min)	Vc (Mpa)	Kc (N/mm)	k - Ketetapan	η- Efisiensi (%)	Cutting Power (kW)
0.5	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.187
0.5	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.315
0.5	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.627
1	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.375
1	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.630
1	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	1.253 X
2	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.750
2	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	1.261 X
2	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	2.506 X

Pada Tabel 2 diatas dapat dilihat bahwa pada beberapa Cutting Parameter memiliki Cutting Power yang melenihi 90% dari daya spindel 1.2kW ditandai dengan (X)silang, ini menunjukkan bahwa cutting parameter tersebut tidak direkomendasikan.

Pengujian ini menghitung gaya potong tangensial yang bekerja terhadap Cutting Parameter pada spindel 2.2kW adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Cutting parameter pada spindel 2.2 kW

aP (mm)	f (mm/min)	Vc (Mpa)	Kc (N/mm)	k - Ketetapan	η- Efisiensi (%)	Cutting Power (kW)
0.5	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.187
0.5	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.315
0.5	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.627
1	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.375
1	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.630
1	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	1.253
2	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.750
2	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	1.261
2	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	2.506 X

Pada Tabel 3 diatas dapat dilihat bahwa pada beberapa Cutting Parameter memiliki Cutting Power yang melenihi 90% dari daya spindel 2.2kW ditandai dengan (X)silang, ini menunjukkan bahwa cutting parameter tersebut tidak direkomendasikan.

3.2 Gaya Potong Tangensial

Perhitungan gaya potong bertujuan untuk mengetahui variable apa saja yang bekerja dan besaran gaya potong tangensial yang terjadi pada saat proses machining.

Tabel 4. Hasil perhitungan untuk DOC 0.5mm

Description		aluminium	aluminium	aluminium
Number of insert/cutter	Z	4	4	4
Axial DOC (mm)	Ap	0.5	0.5	0.5
Radial WOC (mm)	Ae	0.01	0.02	0.05
Feed per tooth (mm/min)	f	0.01	0.02	0.05
Cutting speed (m/min)	vc	400	400	400
Machine efficiency factor		0.9	0.9	0.9
Ultimate tensile strength (Mpa)	σ	310	310	310
Cross-sectional area of the uncut chip	A	0.005	0.01	0.025
Number of teeth engaged with the workpiece (mm ²)	Zc	4	4	4
Machinability factor	Ef	1.1	1.1	1.1
Cutting tool wear factor	Tf	1.1	1.1	1.1
Tangential cutting force (N)	Ft	7.502	15.004	37.51

Tabel 5. Hasil perhitungan untuk DOC 1mm

Description		aluminium	aluminium	aluminium
Number of insert/cutter	Z	4	4	4
Axial DOC (mm)	Ap	1	1	1
Radial WOC (mm)	Ae	0.01	0.02	0.05
Feed per tooth (mm/min)	f	0.01	0.02	0.05
Cutting speed (m/min)	vc	400	400	400
Machine efficiency factor		0.9	0.9	0.9
Ultimate tensile strength (Mpa)	σ	310	310	310
Cross-sectional area of the uncut chip (mm ²)	A	0.01	0.02	0.05
Number of teeth engaged with the workpiece	Zc	4	4	4
Machinability factor	Ef	1.1	1.1	1.1
Cutting tool wear factor	Tf	1.1	1.1	1.1
Tangential cutting force (N)	Ft	15.004	30.008	75.02

Tabel 6. Hasil perhitungan untuk DOC 2mm

Description		aluminium	aluminium	aluminium
Number of insert/cutter	Z	4	4	4
Axial DOC (mm)	Ap	2	2	2
Radial WOC (mm)	Ae	0.01	0.02	0.05
Feed per tooth (mm/min)	f	0.01	0.02	0.05
Cutting speed (m/min)	vc	400	400	400
Machine efficiency factor		0.9	0.9	0.9
Ultimate tensile strength (Mpa)	σ	310	310	310

Description		aluminium	aluminium	aluminium
Cross-sectional area of the uncut chip (mm ²)	A	0.02	0.04	0.1
Number of teeth engaged with the workpiece	Zc	4	4	4
Machinability factor	Ef	1.1	1.1	1.1
Cutting tool wear factor	Tf	1.1	1.1	1.1
Tangential cutting force (N)	Ft	30.008	60.016	150.04

3.3 Tegangan Lentur dan Inersia

Dari Gaya potong yang dihasilkan dilanjutkan dengan menghitung tegangan lentur sebagai berikut:

Tabel 7. Perhitungan tegangan lentur poros spindel 0.8kW

Beban Lentur Motor 0.8 kW					
Diameter Poros Spindel	Gaya Potong (N)	L (mm)	I (mm ⁴)	Y (mm)	Beban Lentur (N/mm ²)
8	7.502	30	201.06	4	4.48
	15.004	30	201.06	4	8.95
	37.51	30	201.06	4	22.39
	15.004	30	201.06	4	8.95
	30.008	30	201.06	4	17.91
	75.02	30	201.06	4	44.77
	30.008	30	201.06	4	17.91
	60.016	30	201.06	4	35.82
	150.04	30	201.06	4	89.55

Tabel 8. Perhitungan tegangan lentur poros spindel 1.5kW

Beban Lentur Motor 1.5 kW					
Diameter Poros Spindel	Gaya Potong (N)	L (mm)	I (mm ⁴)	Y (mm)	Beban Lentur (N/mm ²)
14	7.502	30	2485.05	7.5	0.68
	15.004	30	2485.05	7.5	1.36
	37.51	30	2485.05	7.5	3.40
	15.004	30	2485.05	7.5	1.36
	30.008	30	2485.05	7.5	2.72
	75.02	30	2485.05	7.5	6.79
	30.008	30	2485.05	7.5	2.72
	60.016	30	2485.05	7.5	5.43

150.04 30 2485.05 7.5 13.58

Tabel 9. Perhitungan tegangan lentur poros spindel 2.2kW

Beban Lentur Motor 2.2 kW					
Diameter Poros Spindel	F (N)	L (mm)	I (mm ⁴)	Y (mm)	Beban Lentur (N/mm ²)
23	7.502	30	13736.66	11.5	0.19
	15.004	30	13736.66	11.5	0.38
	37.51	30	13736.66	11.5	0.94
	15.004	30	13736.66	11.5	0.38
	30.008	30	13736.66	11.5	0.75
	75.02	30	13736.66	11.5	1.88
	30.008	30	13736.66	11.5	0.75
	60.016	30	13736.66	11.5	1.51
	150.04	30	13736.66	11.5	3.77

3.4 Defleksi poros spindel

Dari Tegangan lentur dan Inersia yang dihasilkan dilanjutkan dengan menghitung tegangan lentur sebagai berikut:

Tabel 10. Perhitungan defleksi poros spindel 0.8kW

Defleksi Motor 0.8 kW							
Diameter Poros Spindel	Ap	f	Gaya yg bekerja (P)	Panjang bentangan (L)	Elastisitas bahan (E)	Inersia Penampang (I)	Hasil
8	0.5	0.01	7.502	30	220000	201.06	0.00153
	0.5	0.02	15.004	30	220000	201.06	0.00305
	0.5	0.05	37.51	30	220000	201.06	0.00763
	1	0.01	15.004	30	220000	201.06	0.00305
	1	0.02	30.008	30	220000	201.06	0.00611
	1	0.05	75.02	30	220000	201.06	0.01526
	2	0.01	30.008	30	220000	201.06	0.00611
	2	0.02	60.016	30	220000	201.06	0.01221
	2	0.05	150.04	31	220000	201.06	0.03368
mm	mm	(mm / teeth)	N	mm	Mpa	m ⁴	mm

Tabel 11. Perhitungan defleksi poros spindel 1.5kW**Defleksi Motor 1.5 kW**

Diameter Poros Spindel	Ap	f	Gaya yg bekerja (P)	Panjang bentangan (L)	Elastisitas bahan (E)	Inersia Penampang (I)	Hasil
14	0.5	0.01	7.502	30	220000	2485.1	0.00012
	0.5	0.02	15.004	30	220000	2485.1	0.00025
	0.5	0.05	37.51	30	220000	2485.1	0.00062
	1	0.01	15.004	30	220000	2485.1	0.00025
	1	0.02	30.008	30	220000	2485.1	0.00049
	1	0.05	75.02	30	220000	2485.1	0.00123
	2	0.01	30.008	30	220000	2485.1	0.00049
	2	0.02	60.016	30	220000	2485.1	0.00099
	2	0.05	150.04	31	220000	2485.1	0.00273
mm	mm	(mm / teeth)	N	mm	Mpa	m4	mm

Tabel 12. Perhitungan defleksi poros spindel 2.2kW

Defleksi Motor 2.2 kW							
Diameter Poros Spindel	Ap	f	Gaya yg bekerja (P)	Panjang bentangan (L)	Elastisitas bahan (E)	Inersia Penampang (I)	Hasil
23	0.5	0.01	7.502	30	220000	13736.7	0.00002
	0.5	0.02	15.004	30	220000	13736.7	0.00004
	0.5	0.05	37.51	30	220000	13736.7	0.00011
	1	0.01	15.004	30	220000	13736.7	0.00004
	1	0.02	30.008	30	220000	13736.7	0.00009
	1	0.05	75.02	30	220000	13736.7	0.00022
	2	0.01	30.008	30	220000	13736.7	0.00009
	2	0.02	60.016	30	220000	13736.7	0.00018
	2	0.05	150.04	31	220000	13736.7	0.00049
mm	mm	(mm / teeth)	N	mm	Mpa	m4	mm

3.5 Gaya Potong spesifik

Tabel 13. Perhitungan gaya potong spesifik

KC1 (Mpa)	HM	MC	KC (N/mm)
800	0.01	-0.25	2529.82
800	0.02	-0.25	2127.32
800	0.05	-0.25	1691.79

3.6 Daya Potong

Tabel 14. Perhitungan Daya potong yang dihasilkan

aP (mm)	f (mm/min)	Vc (Mpa)	Kc (N/mm)	k - Ketetapan	η- Efisiensi (%)	Cutting Power (kW)
0.5	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.187
0.5	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.315
0.5	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.627
1	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.375
1	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	0.630
1	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	1.253
2	0.01	800	2529.8	$60 \cdot 10^3$	90%	0.750
2	0.02	800	2127.3	$60 \cdot 10^3$	90%	1.261
2	0.05	800	1691.8	$60 \cdot 10^3$	90%	2.506 X

4. KESIMPULAN

Pada tugas akhir yang berjudul “Perancangan dan Analisa Spindel CNC Milling Desktop” terdapat beberapa kesimpulan yang diperoleh diantaranya adalah sebagai berikut :

Dalam merancang Spindel untuk mesin CNC desktop yang ditujukan untuk mengerjakan material yang lunak seperti Aluminium 6061, Penulis membuat perbandingan antara 3(tiga) klasifikasi Spindel pada *powernya* yaitu 0.8kW, 1.2kW dan 2.2kW. Dikarenakan 3(tiga) klasifikasi Spindel tersebut mudah di dapat dan terjangkau harganya.

Analisa yang sudah dilakukan menunjukkan gaya potong yang maksimal adalah sebesar $F_t = 150.04 \text{ N}$ pada motor Spindel berdaya 0.8kW dengan defleksi 0.03053mm, untuk motor Spindel berdaya 1.2kW dengan defleksi 0.00247mm, dan untuk motor Spindel berdaya 2.2kW dengan defleksi 0.00045mm. Defleksi tersebut diambil dengan $A_p=0.5\text{mm}$ dan $f=0.05\text{mm/teeth}$.

Ditemukan bahwa Cutting Force yang dihasilkan dari Cutting parameter yang digunakan juga tidak semua bisa digunakan di 3(tiga) sampel Spindel terdapat batasannya yakni dari *Depth of Cut* atau A_p 0.5mm, 1mm, 2mm serta *Wide of Cut* atau A_e 0.01mm, 0.02mm, 0.05mm, Diketahui bahwa Spindel 0.8kW tidak mampu untuk A_p 1mm, A_e 0.05mm; $A_p2\text{mm}$, A_e 0.01mm, 0.02mm, 0.05mm. Untuk Spindel 1.2kW tidak mampu untuk A_p 1mm, A_e 0.05mm; A_p 2mm, A_e 0.02mm, 0.05mm. Untuk Spindel 2.2kW tidak mampu untuk $A_p2\text{mm}$, A_e 0.05mm.

Dari proses penelitian ini penulis semakin dapat memahami perhitungan analisa gaya potong dan tegangan lentur dalam proses milling yang terkait dengan spindel.

5. DAFTAR RUJUKAN

- [1] “CNC machining | Definition | Processes | Machinery | Automation |.” Accessed: Jun. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.fastems.com/CNC-machining/>
- [2] “CNC Routing Guide | Hammerspace Workshop.” Accessed: Jul. 02, 2024. [Online]. Available: <https://hammerspacehobby.com/CNC-routing-guide/>

- [3] "CNC Machining: What Is It? How Does It Work? Types, Codes." Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.iqsdirectory.com/articles/CNC-machining.html>
- [4] "Unveiling the Essential CNC Milling Parts: Your Guide to Precision Machining." Accessed: Jun. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.3erp.com/blog/unveiling-the-essential-CNC-milling-parts-your-guide-to-precision-machining/>
- [5] "Understanding tangential cutting force when milling | Cutting Tool Engineering." Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.ctemag.com/articles/understanding-tangential-cutting-force-when-milling>
- [6] W. Wahyu Abdi, "Rancang Bangun Woodworking CNC Machine (Wcm) 3 Axis (X, Y, Dan Z) Menggunakan Motor Stepper Mach3 Pc Base," *Rancang Bangun Woodworking CNC Machine*, pp. 1–130, 2017.
- [7] H. Russel, *10th edition Mechanics of Materials*, vol. 11, no. 1. 2018. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-59379-1%0A>
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-420070-8.00002-7%0A>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ab.2015.03.024%0A>
<https://doi.org/10.1080/07352689.2018.1441103%0A> <http://www.chile.bmw-motorrad.cl/sync/showroom/lam/es/>
- [8] Wwww.machiningdoctor.com, "Specific Cutting Force (KC & KC1) - Machining Doctor." Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.machiningdoctor.com/glossary/specific-cutting-force-kc-kc1/#kcc>
- [9] "Table Feed vs Metal Removal Rate." Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.kyoceraprecisiontools.com/mfh/study/>
- [10] Wwww.mmc-carbide.com, "Cutting Power for Turning - Technical Info/Cutting Formula | MITSUBISHI MATERIALS CORPORATION." Accessed: Jun. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.mmc-carbide.com/us/technical_information/formula/tec_turning_cutting_power_formula
- [11] Matweb, "Aluminum 6061-T6; 6061-T651," *MatWeb*, pp. 1–2, 2015, [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b29693>
- [12] "CNC Motor Spindel 800W 0.8kw ER11 ER16 Pendingin Udara Putaran Spindel + AC 200-240V Pengendali Kecepatan Mendukung MACH3 + 52Mm Mount - AliExpress." Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: <https://id.aliexpress.com/i/1005004058206643.html?gatewayAdapt=glo2idn>
- [13] "ER Collet Sizes - LittleMachineShop.com." Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: https://littlemachineshop.com/info/er_collet_sizes.php
- [14] Matweb, "AISI 1060 Steel," *MatWeb*, pp. 1–2, 2015, [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b29693>

- [15] Matweb, "AISI 1006 Steel, cold drawn," *MatWeb*, pp. 1–2, 2015, [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b29693>
- [16] "Maximizing spindel power usage," pp. 1–4, [Online]. Available: <https://cadem.com/wp-content/uploads/2020/09/understanding-CNC-spindel-power.pdf>