

**PENGARUH MATERIAL REMOVAL RATE (MRR)
UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILING 3
AXIS**

Oleh

MUHAMMAD BABLU

F 331 18 092



SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi syarat guna memperoleh gelar

Sarjana Teknik

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TADULAKO

2025

**PENGARUH MATERIAL REMOVAL RATE (MRR)
UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILING 3
AXIS**

Oleh

MUHAMMAD BABLU

F 331 18 092



SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi syarat guna memperoleh gelar

Sarjana Teknik

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TADULAKO

2025

**THE INFLUENCE OF MATERIAL REMOVAL RATE (MRR) ON
INCREASING EFFICIENCY IN THE 3-AXIS CNC MILLING PROCESS**

BY:

**MUHAMMAD BABLU
F33118092**



UNDERGRADUATE THESIS

*Submitted as a partial fulfillment of the requirements for Bachelor Degree
at Engineering*

**MECHANICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING
TADULAKO UNIVERSITY
2025**



HALAMAN PENGESAHAN

**PENGARUH MATERIAL REMOVAL RATE (MRR) UNTUK
MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILING 3 AXIS**

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:



MUHAMMAD BABLU

F331180092

SKRIPSI

Telah dipertahankan didepan Majelis Penguji dan dinyatakan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Strata Satu (S1) Teknik Mesin

Pada tanggal 25 Juni 2025

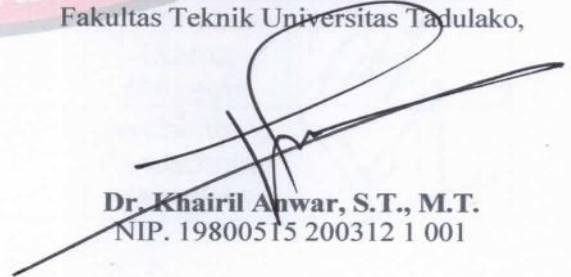
Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik Universitas
Tadulako,



Ir. Andi Arham Adam, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19740323 199903 1 002

Ketua Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Tadulako,



Dr. Khairil Anwar, S.T., M.T.
NIP. 19800515 200312 1 001

HALAMAN PERSETUJUAN

Panitia ujian Tugas Akhir/Skripsi yang diketahui oleh Ketua Program Studi Strata Satu Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako, menyatakan bahwa Tugas Akhir/Skripsi dengan judul:

"PENGARUH *MATERIAL REMOVAL RATE* (MRR)

UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILING 3 AXIS"

yang disusun oleh :

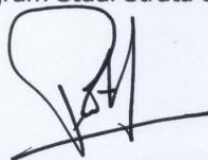
MUHAMMAD BABLU / F33118092

Telah berhasil dipertahankan di hadapan panitia ujian tugas akhir pada tanggal 26 Juni 2025 dan disetujui sebagai syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik.

NO	NAMA PEMBIMBING/PENGUJI	JABATAN	TANDA TANGAN
1	Dr. Ir. Sri Chandrabakty, ST.,M.Eng.	Ketua	
2	Ir.Muhammad Syaifula Fadly A.Majid,ST.,MT	Sekretaris	
3	Ir. Ramang Magga, ST., MT.,	Anggota	
4	Jumaddil Hair,ST.,MT	Pembimbing Utama /Anggota	
5	Dr.Ir.Rustan Hatib,ST.,MT	Pembimbing Pendamping /Anggota	

Palu, 28 Juni 2025

Ketua Program Studi Strata Satu Teknik Mesin



(Dr. Ir. Rustan Hatib, ST., MT.)

NIP. 197807202007101001

PERNYATAAN ORISINALITAS TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MUHAMMAD BABLU

Stambuk : F33118092

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa **tugas akhir** yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan disertai ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Palu, 28 Juni 2025

Yang menyatakan,



MUHAMMAD BABLU

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TADULAKO
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN



Jl. Soekarno Hatta Km.9 Telp. (0451) 422611 - 422355 Fax. (0451) 454014
Website: <http://mesin.fatek.untad.ac.id>, Email: teknikmesin@untad.ac.id
Palu – Sulawesi Tengah 94118

KETERANGAN HASIL PENGECEKAN SIMILARITAS

No. 044/UN28.1.31.KHPS/TM/2025

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dr. Ir. Muhammad Hasan Basri, S.T., M.T.
NIP : 197709062005011002
Jabatan : Sekretaris Jurusan Teknik Mesin

Menerangkan bahwa naskah Tugas Akhir (Skripsi):

Nama : Mohammad Bablu
Stambuk : F33118092
Judul Tugas Akhir : Pengaruh Material Removal Rate (MRR) Untuk Meningkatkan Efisiensi pada Proses CNC Milling 3 Axis

Telah melalui pengecekan similaritas menggunakan turnitin, dengan hasil *similarity index* 24 %, dan dinyatakan ~~memenuhi/tidak memenuhi~~ syarat ketentuan publikasi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako, yaitu maksimal 30%.

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Palu, 23 Juni 2025

Sekretaris Jurusan,

Dr. Ir. Muhammad Hasan Basri, S.T., M.T.
NIP. 19770906 200510 1 002

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya*, saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**PENGARUH MATERIAL REMOVAL RATE (MRR) UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILLING 3 AXIS**". Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi S1 Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Tadulako.

Penulis menyadari bahwa sebagai manusia biasa dengan segala keterbatasan kemampuan tentunya tidak luput dari kelemahan dan kekurangan, seperti halnya dalam penulisan skripsi ini mungkin masih terdapat kekurangan sangat diperlukan saran dari pembaca guna penyempurnaan skripsi ini.

Dalam rangka penyusunan skripsi ini, saya menghadapi banyak kendala namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, skripsi ini dapat saya selesaikan sesuai dengan waktu yang ditentukan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada

1. Rektor Universitas Tadulako.
2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
3. Wakil Dekan 1 Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
4. Wakil Dekan 2 Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
5. Wakil Dekan 3 Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
6. Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Tadulako.
7. Koordinator Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Tadulako.
8. Bapak Jumaddil Hair, S.T., M.T. dan DR.Ir,Rustan Hatib ST., MT. selaku Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberi masukan dan memotivasi penulis dalam penyusunan skripsi.

9. Bapak Dr. Ir. Sri Chandrabakty, S.T., M.Eng. Bapak Bapak Ir. Muhammad Syaiful Fadly A. Majid, ST., MT., dan Ir. Ramang magga ST., MT. selaku dosen penguji yang banyak memberi masukan untuk perbaikan skripsi tersebut.
10. Seluruh staf penanggung jawab Laboratorium Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako yang telah banyak membantu dalam proses pengambilan data yang saya perlukan selama penelitian.
11. Segenap staf administrasi yang telah sabar melayani kebutuhan administrasi penulis selama studi di Jurusan Teknik Mesin.
12. Tertuntut alm. bapak sy Baso Bau dan ibu sy Asmiati amir dan nenek saya serta keluarga dan kerabat yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral kepada penulis.
13. Teman-teman Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin khususnya mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2018 yang selalu memberikan dukungannya.
14. Sahabat dan teman yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
15. Kepada adek saya zaskia angkatan 2021 terima kasih banyak membantu saya untuk mengambil data

Akhir kata, dengan harapan semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat memberi manfaat bagi para akademisi, praktisi dan peneliti-peneliti yang relevan dengan bidang ilmu ini.

Palu, 20 juni 2025



MUHAMMAD BABLU

F 331 18 092

ABSTRAK

Muhammad Bablu PENGARUH MATERIAL REMOVAL RATE (MRR)

UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PADA PROSES CNC MILING 3 AXIS(Jumaddil Hair, S.T.,M.T. dan DR.Ir,Rustan Hatib ST., MT) CNC milling 3-axis merupakan salah satu teknik permesinan presesi yang banyak digunakan dalam industri manufaktur modern. Salah satu faktor kunci yang mempengaruhi kinerja proses ini adalah proses ini adalah Material Removal Rate (MRR), yakni kecepatan material dari benda kerja. Penelitian ini mengevaluasi dampak perubahan pada MRR yang terhadap efisiensi proses permesinan dengan mengatur parameter utama seperti kecepatan spindle, laju pemakanan, dan kedalaman pemotongan. Efisiensi diukur yang berdasarkan durasi pemesinan, kualitas permukaan hasil akhir dan penggunaan energi. Hasil analisis menunjukan bahwa peningkatan pada MRR yang dapat mempercepat proses produksi dan mengurangi pada konsumsi energi, namun beresiko menurunkan kualitas permukaan jika tidak dikontrol tepat. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan optimal dalam menentukan pada parameter untuk memastikan keseimbangan antara produktivitas dan pada mutu permesinan. Kajian ini dapat memberikan wawasan bagi meningkatkan pada efisiensi proses pada mesin CNC milling 3-axis dan secara keseluruhan.

Kata Kunci: MRR, CNC milling 3-axis, efisiensi permesinan, parameter proses, hasil akhir permukaan

ABSTRACT

Muhammad Bablu THE EFFECT OF MATERIAL REMOVAL RATE (MRR) TO IMPROVE EFFICIENCY IN 3-AXIS CNC MILLING PROCESS (Jumaddil Hair, S.T., M.T. and DR.Ir,Rustan Hatib ST., MT) 3-axis CNC milling is one of the precession machining techniques that is widely used in modern manufacturing industries. One of the key factors that affect the performance of this process is the Material Removal Rate (MRR), which is the speed of material from the workpiece. This study evaluates the impact of changes in MRR on the efficiency of the machining process by adjusting the main parameters such as spindle speed, feed rate, and cutting depth. Efficiency is measured based on machining duration, final surface quality and energy consumption. The results of the analysis indicate that an increase in MRR can accelerate the production process and reduce energy consumption, but risks reducing surface quality if not controlled properly. Therefore, an optimal approach is needed in determining the parameters to ensure a balance between productivity and machining quality. This study can provide insight into improving process efficiency in 3-axis CNC milling machines and overall.

Keywords: MRR, 3-axis CNC milling, machining efficiency, process parameters, surface finish

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	i
HALAMAN PERSTUJUAN	iii
PERNYATAAN ORGINALITAS TUGAS AKHIR	iv
KETERANGAN PENGECEKAN TURNITIN	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II	2
2.1. Mesin CNC Milling	2
2.2. Parameter Pemesinan CNC Milling	7
2.3. Proses Pemesinan CNC Milling	7
2.3.1. Frais Periperal (Peripheral Milling)	8
2.3.2. Frais Muka (Face Milling)	8
2.3.3. Frais Jari (End Milling)	8
2.4. Komponen Utama Mesin CNC Milling	10

2.4.1 Rangka (Frame)	11
2.4.2. Poros (Spindle)	11
2.4.3. Sumbu Mesin	11
2.4.4. Kolom Mesin	12
2.4.5. Panel Kendali CNC	12
2.4.6. Pencengkam Alat (Tool Holder)	12
2.4.7. Meja Mesin	12
2.4.8. Tangki Pendingin (Coolant)	13
2.4.9. Ragum	13
2.5. Material Removal Rate (MRR) pada CNC Milling	13
2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Material Removal Rate (MRR) dalam Milling 3-Axis	15
2.6.1. Kecepatan Potong (Cutting Speed)	15
2.6.2. Kecepatan Makan (Feed Rate)	15
2.6.3. Kedalaman dan Lebar Potong (Depth and Width of Cut)	16
2.6.4. Jenis Material Benda Kerja	16
2.6.5. Jenis dan Geometri Pahat	16
2.6.6. Penggunaan Pendingin dan Pelumas (Coolant)	16
2.6.7. Kekakuan Mesin dan Sistem Pengekaman	17
2.6.8. Strategi Jalur Pemotongan (Toolpath Strategy)	17
2.7. Pengaruh Parameter Pemesinan	17
2.8. Optimasi MRR	17
2.7. Variabel Proses	18
2.8. Gerak Makan	19
2.9. Kecepatan Putaran Spindel pada CNC Milling	19
2.10. Kedalaman Pemotongan	20
2.11. Mesin Micromil CNC Milling	21
2.12. Macam Pemakanan Pada Mesin Milling	21

2.12.1. Slab Milling	21
2.12.2 Face Milling	22
2.13.2. End Milling	22
2.14. Arah Pemotongan Mesin Milling	23
2.15. Jenis-jenis Pahat dalam Permesinan Pada Cnc Milling	25
2.15.1. End Mill Cutter	25
2.15.2. Face Mill Cutter	25
2.15.3. Ball Nose Cutter	25
2.15.4. Slot Mill / Slitting Cutter	25
2.15.5. Chamfer Mill	25
2.15.6. Thread Mill Cutter	25
2.15.7. Fly Cutter	26
2.15.8. Insert Type Milling Cutter	26
2.16. Aluminium	26
2.17. Jenis-jenis Aluminium	26
BAB III	34
3.1. Tempat Dan Waktu Penelitian	34
3.2. Teknik Pengumpulan Data	34
3.3. Variabel Penelitian	34
3.3.1. Variabel Bebas	34
3.3.2. Variabel Terkontrol	34
3.3.3. Variabel Terikat	34
3.4. Alat Dan Bahan	35
3.4.1. Alat Yang Digunakan	35
3.4.2. Bahan Penelitian	35
Daftar Pustaka	48

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Milling CNC Machine Model SK20

Gambar 2.2. Rangka (Frame)

Gambar 2.3. Poros (Spindle)

Gambar 2.4. Sumbu

Gambar 2.5. Kolom

Gambar 2.6. Panel Kendali CNC

Gambar 2.7. Pencengkam Alat (Tool Holder)

Gambar 2.8. Meja

Gambar 2.9. Tangki Pendingin (Coolant)

Gambar 2.10. Ragum

Gambar 2.13 A. Slab Milling, B. Face Milling, C. End Milling

Gambar 2.14. Slab Milling

Gambar 2.15. Face Milling

Gambar 2.16. End miling

Gambar 2.17. Up Milling atau Conventional Milling

Gambar 2.18. Down Milling atau Climb Milling

Gambar 3.1. Milling CNC Machine Model SK20

Gambar 3.3. Jangka Sorong

Gambar 3.4. Alumunium 6061

Gambar 3.5 . Mata Pahat (HSS END MILLS).

Gambar 3.6. Timbangan Digital

DAFTAR TABEL

3.1. Jadwal Kegiatan Penelitian

4.1. Data hasil pengukuran Material Removal Rate (MRR) pada pahat dan lebar pemakanan

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
RPM	Kecepatan Spindel	(RPM)
<i>VC</i>	Kecepatan Potong	(M/Menit)
d	Dimeter Benda Kerja	(MM)
π	Putaran Benda Kerja	(Putaran/Menit)
n	Kecepatan Spindel	(RPM)
<i>V</i>	Kecepatan potong dalam meter	(N/Min)
<i>D</i>	Dimeter pahat dalam milimeter	(MM)
<i>to</i>	Tabel chip	
ft	Feed per tooth	
ϕ	Cutting effective angle	

BAB 1

PENDHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Dalam era industri modern, efisiensi produksi menjadi faktor utama yang menentukan daya saing suatu perusahaan manufaktur. Proses pemesinan merupakan salah satu bagian penting dalam industri manufaktur, khususnya dalam pembuatan komponen-komponen presisi tinggi. Seiring berkembangnya teknologi, penggunaan mesin Computer Numerical Control (CNC) telah menjadi pilihan utama dalam berbagai proses pemesinan karena kemampuannya menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi dan konsistensi yang baik.

Salah satu jenis mesin CNC yang banyak digunakan adalah CNC milling 3 axis, yang mampu melakukan pemesinan secara simultan dalam tiga arah sumbu koordinat. Mesin ini sangat efisien untuk menghasilkan bentuk-bentuk geometri kompleks dengan tingkat presisi tinggi. Namun, efisiensi keseluruhan proses masih sangat tergantung pada pengaturan parameter pemesinan yang tepat, seperti kecepatan potong, feed rate, kedalaman pemotongan, dan khususnya laju penghilangan material atau Material Removal Rate (MRR).

Material Removal Rate (MRR) merupakan indikator utama dalam mengevaluasi kinerja suatu proses pemesinan. MRR menggambarkan seberapa banyak material yang dapat dihilangkan dari benda kerja dalam satuan waktu tertentu. Semakin tinggi nilai MRR, semakin besar kemungkinan proses berlangsung cepat, sehingga waktu pemesinan dapat diminimalkan dan produktivitas meningkat. Namun demikian, peningkatan MRR harus tetap mempertimbangkan aspek kualitas dan stabilitas proses.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa pengaturan MRR yang optimal dapat meningkatkan efisiensi proses secara signifikan.

Menurut Kumar dkk (2018), optimasi MRR pada mesin CNC dapat mengurangi waktu pemrosesan sekaligus mempertahankan kualitas permukaan benda kerja. Dalam penelitian lain oleh Thamizhmanii dkk. (2015), ditemukan bahwa MRR yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan suhu potong dan getaran yang berdampak pada keausan alat dan kerusakan permukaan benda kerja.

Pada mesin CNC milling 3 axis, keterbatasan arah gerak menjadikan pengaturan parameter proses menjadi lebih kritis. Tidak hanya dituntut untuk mencapai MRR yang tinggi, tetapi juga harus menjaga agar proses tetap stabil dan tidak menyebabkan kerusakan pada mesin atau alat potong. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana variasi MRR mempengaruhi efisiensi secara menyeluruh dalam sistem pemesinan CNC tersebut.

Efisiensi dalam konteks penelitian ini tidak hanya dilihat dari segi waktu pemesinan, tetapi juga mencakup konsumsi energi, umur alat potong, serta kualitas permukaan hasil akhir. Penelitian oleh Prajapati dan Patel (2020) menunjukkan bahwa keseimbangan antara MRR dan kualitas hasil pemesinan harus diperhatikan untuk mencapai efisiensi optimal dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pendekatan yang holistik dan eksperimental sangat diperlukan dalam mengkaji pengaruh MRR terhadap efisiensi proses CNC milling 3 axis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengambil judul **Pengaruh Variasi MRR Untuk Meningkatkan Efisiensi Pada Proses Pemesinan CNC Milling 3 Axis**, dengan harapan dapat memberikan data dan rekomendasi parameter pemesinan yang optimal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan produktivitas dan efektivitas kerja mesin CNC, serta menjadi acuan bagi pelaku industri maupun peneliti dalam bidang manufaktur presisi.

1.2. Rumusan Masalah

Dalam proses manufaktur menggunakan mesin CNC Milling 3 Axis, efisiensi produksi bergantung pada parameter pemesinan yang digunakan. Nilai Material Removal Rate (MRR) merupakan salah satu faktor yang untuk menentukan efisiensi proses ini. Namun, masih terdapat tantangan dalam menentukan parameter optimal untuk meningkatkan MRR tanpa mengorbankan kualitas hasil pengerjaan. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menjawab pertanyaan berikut:

1. Bagaimana pengaruh parameter pemesinan terhadap Material Removal Rate (MRR) dalam proses CNC Milling 3 Axis?
2. Seberapa besar peningkatan efisiensi yang dapat dicapai dengan optimasi MRR?
3. Apa parameter optimal yang dapat digunakan untuk mencapai efisiensi terbaik dalam proses CNC Milling 3 Axis?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh parameter pemesinan terhadap Material Removal Rate (MRR) pada proses CNC Milling 3 Axis.
2. Mengidentifikasi hubungan antara Material Removal Rate (MRR) dengan efisiensi pemesinan dalam proses milling.
3. Menentukan parameter pemesinan optimal yang dapat meningkatkan efisiensi tanpa mengorbankan kualitas hasil kerja.

1.4. Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terfokus dan terarah, beberapa batasan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Proses yang diteliti hanya terbatas pada CNC Milling 3 Axis.
2. Material benda kerja yang digunakan dibatasi pada satu jenis material tertentu, misalnya Aluminium 6061 atau baja karbon rendah.

3. Parameter pemesinan yang dianalisis meliputi kecepatan spindle (spindle speed), laju pemakanan (feed rate), dan kedalaman potong (depth of cut).
4. Pengujian dilakukan dalam skala laboratorium dengan menggunakan mesin CNC yang tersedia.
5. Hasil yang diamati mencakup nilai MRR dan kualitas permukaan hasil pengerjaan.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Industri Manufaktur Memberikan rekomendasi parameter pemesinan optimal untuk meningkatkan efisiensi produksi.
2. Bagi Akademisi dan Peneliti Menambah wawasan mengenai hubungan antara MRR dan efisiensi dalam proses CNC Milling.
3. Bagi Operator CNC Memberikan panduan praktis dalam mengoptimalkan proses pemesinan guna meningkatkan produktivitas.
4. Bagi Pengembangan Teknologi CNC Memberikan data yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja mesin dan perangkat lunak CNC di masa depan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin CNC Milling

Awal lahirnya mesin CNC (Computer Numerically Controlled) bermula dari tahun 1952 yang dikembangkan oleh John Pearseon dari Institut Teknologi Massachusetts nama Angkatan Udara Amerika Serikat, semula proyek tersebut bertujuan untuk membuat benda kerja khusus yang rumit. Pada tahun 1973 mesin CNC masih sangat mahal sehingga masih sedikit perusahaan yang memiliki keberanian untuk memelopori investasi dalam teknologi ini (Zubaidi, 2012). Mesin CNC adalah suatu mesin yang dikontrol oleh komputer dengan menggunakan bahasa numerik (data perintah dengan kode angka, huruf dan simbol) sesuai standar ISO. Sistem kerja teknologi mesin CNC ini akan lebih sinkron antara komputer dan mekanik, sehingga jika dibandingkan dengan mesin perkakas yang sejenis maka mesin perkakas CNC lebih teliti, lebih tepat, lebih fleksibel dan cocok untuk produksi masal.

CNC milling merupakan mesin milling dimana pergerakan meja mesinnya dikendalikan dalam suatu program. Program tersebut berisi langkah-langkah perintah yang harus dijalankan oleh mesin CNC. Komponen mesin CNC antara lain meja mesin, spindel mesin, magasin tool, monitor, panel kontrol, coolant hose. dirancangnya mesin perkakas CNC dapat menunjukkan produksi yang membutuhkan tingkat kerimitan yang tinggi dan dapat mengurangi campur tangan operator selama mesin beroperasi.

Menurut (Widarto, 2008), mesin CNC milling secara garis besar dibedakan menjadi dua, yaitu mesin CNC milling TU (Training Unit) dan mesin CNC milling PU (Production Unit). Kedua mesin tersebut mempunyai prinsip kerja yang sama, namun pada kedua tipe mesin tersebut terdapat perbedaan pada penggunaannya di lapangan. CNC milling Training Unit dipergunakan

untuk pelatihan dasar pemrograman dan pengoperasian CNC yang dilengkapi dengan EPS (External Programing Sistem), mesin CNC jenis Training Unit dipergunakan untuk pekerjaan ringan dengan bahan yang relatif lunak, sedangkan pada mesin CNC Production Unit dipergunakan untuk produksi massal, sehingga mesin ini dilengkapi dengan assesoris tambahan seperti sistem pembukaan otomatis yang menerapkan prinsip kerja hidrolis, pembuangan tatal dan sebagainya.

Perbedaan utama antara keduanya terletak pada fungsinya. Mesin CNC milling training unit dirancang untuk pelatihan, dengan tujuan mengenalkan dasar-dasar pemrograman dan pengoperasian mesin CNC. Mesin ini lebih banyak digunakan dalam lingkungan pendidikan, seperti di sekolah atau lembaga pelatihan. Sementara itu, mesin CNC milling production unit digunakan untuk keperluan industri dan bisnis, dengan kemampuan untuk menangani pekerjaan yang lebih kompleks dan presisi. Mesin milling konvensional memiliki dua tipe posisi spindel, yaitu vertikal dan horizontal. Perbedaannya terletak pada kemampuan mesin milling vertikal yang memungkinkan kepala spindel untuk diputar, sehingga dapat disesuaikan dalam posisi vertikal hingga horizontal, sedangkan mesin milling horizontal memiliki spindel yang tetap pada posisi horizontal, ideal untuk pemotongan yang lebih besar dan stabil.

Mesin CNC milling memiliki sistem kerja yang lebih canggih karena pengoperasiannya dikendalikan oleh komputer, yang diatur oleh operator atau teknisi. Dibandingkan dengan mesin konvensional atau manual, mesin ini menawarkan tingkat presisi dan akurasi yang lebih tinggi, serta lebih cocok untuk produksi dalam jumlah besar. Mesin ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan industri yang memerlukan produk dengan kompleksitas dan kualitas yang lebih tinggi, dengan mengurangi keterlibatan langsung manusia dalam pengoperasiannya. Hal ini memungkinkan proses produksi menjadi lebih cepat

dan efisien. Beberapa kelebihan mesin CNC milling dibandingkan mesin konvensional antara lain:

1. Produktivitas yang lebih tinggi
2. Presisi yang sangat tepat
3. Penghematan waktu
4. Biaya yang lebih rendah
5. Kemampuan untuk produksi dalam jumlah besar
6. Kemampuan untuk berkolaborasi dengan mesin lain, seperti CAD/CAM.

2.2. Parameter Pemesinan CNC Milling

Parameter pemesinan seperti kecepatan potong, laju umpan, kedalaman potong, geometri pahat, dan kekerasan bahan benda kerja memiliki dampak yang signifikan terhadap kekasaran permukaan dan gaya potong (Walid dkk, 2012). Parameter-parameter ini sangat penting dalam mempengaruhi hasil produk yang dihasilkan, karena masing-masing harus disesuaikan dengan kebutuhan dan tujuan yang diinginkan. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi hasil dari proses pemesinan tersebut.

Parameter pemesinan yang meliputi kecepatan putaran spindle, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemakanan mempengaruhi hasil, khususnya pada kekasaran permukaan (Sugiantoro dkk, 2015). Gaya potong sangat penting dalam proses pemotongan karena berhubungan langsung dengan kinerja pemotongan, seperti keakuratan permukaan, keausan dan kerusakan pahat, suhu pemotongan, energi yang dihasilkan, serta gaya getaran.

2.3. Proses Pemesinan CNC Milling

Proses pemesinan dengan mesin milling adalah metode pemotongan benda kerja yang sangat efisien, karena pisau milling memiliki banyak sisi potong. Jika dibandingkan dengan pisau bubut, pisau milling dapat diibaratkan

sebagai beberapa pisau bubut sekaligus, sehingga lebih efisien. Proses milling sendiri dapat dikelompokkan dalam tiga jenis, yaitu:

2.3.1. Frais Periperal (Peripheral Milling)

Proses milling ini juga dikenal sebagai slab milling, di mana permukaan benda kerja yang diproses dihasilkan oleh gigi pahat yang terletak di bagian luar alat potong. Sumbu putaran pahat umumnya sejajar dengan permukaan benda kerja yang sedang dipotong.

2.3.2. Frais Muka (Face Milling)

Pada proses frais muka, pahat dipasang pada spindel dengan sumbu putaran yang tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Permukaan yang dihasilkan berasal dari penyayatan oleh ujung dan selubung pahat.

2.3.3. Frais Jari (End Milling)

Pada proses frais jari, pahat berputar pada sumbu yang tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Pahat dapat diposisikan pada sudut tertentu untuk menghasilkan permukaan yang menyudut. Gigi potong pada pahat terdapat pada selubung dan ujung pahat untuk memotong permukaan benda kerja.

Teknik penyayatan pada proses milling terbagi menjadi dua jenis, yaitu pemakanan berlawanan arah (up cut milling) dan pemakanan searah (down cut milling). Up cut milling (frais naik), yang juga dikenal sebagai milling konvensional, adalah proses di mana arah putaran pisau bertentangan dengan arah gerakan meja mesin milling. Teknik ini lebih sesuai untuk mesin milling konvensional atau manual, karena mesin tersebut memiliki backlash ulir transportir yang cukup besar dan tidak dilengkapi dengan kompensasi backlash. Sementara itu, down cut milling (frais turun), atau yang dikenal juga sebagai climb milling, adalah proses di mana arah putaran pahat searah dengan arah gerak makan meja mesin milling. "Penampang melintang beram

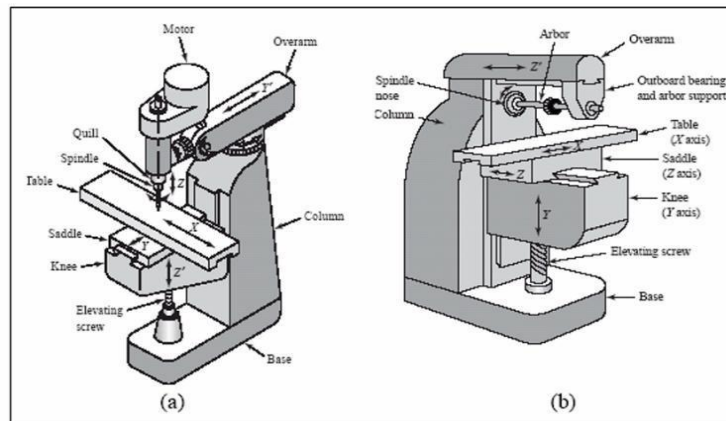
(chips) pada proses milling turun memiliki bentuk seperti koma, dimulai dengan ketebalan maksimal yang kemudian semakin menipis."

Prinsip dasar dari mesin milling (Frais) CNC atau Machining Center (Pusat Pemesinan) CNC adalah benda kerja yang dikerjakan dipasang di atas meja mesin. Benda kerja dapat dicekam langsung di meja atau menggunakan ragum (vice) atau fixture untuk menahannya. Spindle (bagian yang bergerak) bersama alat potong diposisikan secara vertikal atau horizontal. Dengan pengaturan ini, alat potong bisa bergerak sepanjang sumbu X, Y, dan Z untuk memulai proses pemotongan dan pembentukan. Selama proses tersebut, benda kerja atau bagian-bagiannya dapat diposisikan dan dipindahkan oleh meja kerja dalam arah linier menuju sumbu spindle untuk dipotong. Dengan demikian, mesin dapat menghilangkan material dari benda kerja dan membentuknya sesuai dengan desain yang diinginkan. Mesin milling tersedia dalam dua konfigurasi, yaitu vertikal atau horizontal:

Mesin Milling Vertikal: Spindle ditempatkan secara vertikal, memungkinkan alat potong turun untuk memotong permukaan benda kerja, ideal untuk pemotongan permukaan datar.

Mesin Milling Horizontal: Spindle ditempatkan secara horizontal, memungkinkan pemotongan sisi atau bagian tertentu dari benda kerja, biasanya digunakan untuk benda kerja besar atau pemotongan berat.

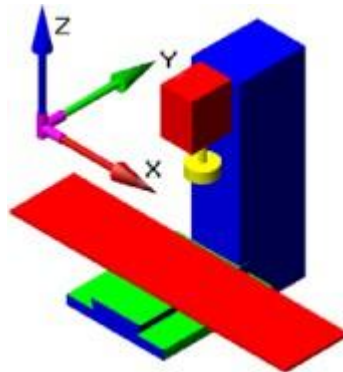
Berikut adalah ilustrasi sederhana yang menggambarkan prinsip dasar pengoperasian Mesin Milling CNC. Dalam ilustrasi ini, benda kerja dipasang pada meja mesin, sementara alat potong yang terpasang pada spindle bergerak di sepanjang sumbu X-Y-Z untuk melakukan pemotongan sesuai dengan desain yang telah ditentukan.



Gambar 2.1. Mesin Milling Vertikal dan Mesin Milling Horizontal

sumber : Widarto (2008)

Berikut adalah ilustrasi sederhana yang menggambarkan prinsip dasar pengoperasian Mesin Milling CNC. Dalam ilustrasi ini, benda kerja dipasang pada meja mesin, sementara alat potong yang terpasang pada spindle bergerak di sepanjang sumbu X-Y-Z untuk melakukan pemotongan sesuai dengan desain yang telah ditentukan. Dapat di lihat pada gambar 2.3 di bawah.



Gambar 2.2. Prinsip Dasar Pengoperasian Mesin Milling CNC.

Sumber : Widarto (2008)

2.4. Komponen Utama Mesin CNC Milling

2.4.1 Rangka (Frame)

Rangka (Frame) adalah struktur utama yang mendukung Mesin milling, memberikan stabilitas dan kekakuan pada mesin. Biasanya, rangka dilengkapi dengan kolom dan alas (base) yang bisa dilepas. Bagian penting dari rangka adalah kepala tetap (Headstock), tempat di mana poros utama dipasang. Meskipun kepala tetap memiliki peran yang sangat penting, bagian ini sering kali kurang diperhatikan. Jika kepala tetap tidak cukup kokoh dan gagal memberikan stabilitas serta dukungan pada poros, hal ini bisa menyebabkan getaran dan suara berisik selama proses pemesinan.

2.4.2. Poros (Spindle)

Poros (Spindle) bisa dianggap sebagai "inti" dari mesin milling CNC. Batang poros biasanya menjadi tempat pemasangan alat potong, yang sering dipasang menggunakanudukan alat. Tergantung pada jenis mesin, poros bisa diposisikan secara vertikal atau horizontal. Untuk memastikan poros tetap berfungsi dengan baik dalam jangka panjang, berbagai jenis pelumas digunakan, seperti Grease Lubrication (yang kurang cocok untuk penggunaan dalam durasi panjang pada kecepatan tinggi), Air-Oil Lubrication (memadai untuk siklus panjang pada kecepatan tinggi), atau Hwacheon Oil-Jet-Lubrication (ideal untuk kondisi apa pun, bahkan pada kecepatan dan durasi yang ekstrem).

2.4.3. Sumbu Mesin

Pada umumnya, mesin milling CNC memiliki sumbu X/Y/Z sebagai sumbu rotasi tambahan, atau bisa juga sumbu C/A atau B, tergantung pada konfigurasi mesin. Sumbu-sumbu ini dapat diprogram melalui penggunaan g-code pada pengontrol CNC.

2.4.4. Kolom Mesin

Kolom pada Machining Center (Pusat Pemesinan) CNC bisa berupa tunggal (seperti Traveling Column HiRex 4000 atau C-Frame seperti HIT 400/360; VESTA line termasuk "B"; SIRIUS-650/850/1050) atau ganda (seperti SIRIUS 1250/2500/L1/L2), tergantung pada tingkat kompleksitas yang diperlukan dalam tugas pemesinan.

2.4.5. Panel Kendali CNC

Panel berfungsi sebagai "sistem saraf" utama mesin, yang mengandung elektronik untuk mengatur berbagai tindakan pemotongan melalui pemrograman. Panel kontrol dilengkapi dengan monitor CNC dan tombol program untuk memasukkan data dan kode. Panel ini juga sering menyediakan opsi untuk pengoperasian manual. Agar memudahkan penggunaan mesin, panel kontrol dirancang agar mudah dijangkau dan diakses.

2.4.6. Pencekam Alat (Tool Holder)

Pencekam alat tersedia dalam berbagai ukuran, sistem, dan aplikasi. Ukuran standar pencekam alat biasanya mencakup BT 30, BT 40, dan BT 50 (BT merujuk pada sudut kerucut atau taper pada pencekam). Untuk meningkatkan ketegaran dan memastikan rotasi yang lebih seimbang dengan kecepatan tinggi, disarankan menggunakan versi BBT atau Sistem HSK. Versi BBT adalah pengembangan dari sistem BT standar yang menyediakan titik kontak ganda antara pencekam alat dan poros, sehingga alat lebih kuat terkoneksi dan terikat, serta mengurangi getaran karena pencekam alat diseimbangkan dengan kelas Q 2.5.

2.4.7. Meja Mesin

Meja mesin berfungsi sebagai alas yang kokoh untuk mencekam benda kerja secara langsung, serta dapat digunakan untuk memasang perlengkapan atau ragum (vice) yang menahan benda kerja di posisinya. Sebagian besar meja dilengkapi dengan T-slot yang memudahkan pemasangan ragum,

perlengkapan, atau benda kerja. Pada mesin CNC milling horizontal, tersedia juga palet dengan lubang Tap (Tap-hole) yang memberikan fleksibilitas lebih besar dalam memindahkan berbagai benda kerja untuk diproses. Selain itu, penggunaan magnet semakin populer untuk pencekaman yang cepat, mudah, dan aman, dan sebaiknya terintegrasi langsung ke dalam meja mesin untuk menghindari perubahan ketinggian sumbu Z.

2.4.8. Tangki Pendingin (Coolant)

Sebagian besar Machining Centers (Pusat Pemesinan) CNC dilengkapi dengan tangki pendingin (coolant) yang berfungsi untuk mengalirkan cairan pendingin ke permukaan pemotongan atau poros (spindle) bersama dengan alat potong selama proses pemesinan. Fungsinya adalah untuk memperpanjang umur alat dan komponen mesin. Selain itu, cairan pendingin juga membantu menghilangkan panas yang dihasilkan selama pemesinan dan menjaga suhu tetap terkendali. Aturan yang diterapkan dalam hal ini adalah "semakin banyak, semakin baik," karena lebih banyak cairan pendingin dapat membantu operator mencegah pemanasan berlebihan pada cairan tersebut.

2.4.9. Ragum

Digunakan untuk menahan benda kerja selama operasi seperti Penggergajian, Pengelasan, Pengamplasan, Atau Pengeboran.

2.5. Material Removal Rate (MRR) pada CNC Milling

Proses pemesinan adalah salah satu tahap penting dalam manufaktur modern, terutama ketika dibutuhkan presisi tinggi dan bentuk geometris yang kompleks. Salah satu indikator utama efisiensi dalam proses pemesinan adalah Material Removal Rate (MRR) atau laju penghilangan material. MRR mengacu pada volume material yang dipotong atau dihilangkan oleh alat potong dalam satuan waktu, dan biasanya dinyatakan dalam mm³/menit.

Pada mesin CNC milling, MRR dapat dihitung dengan rumus:

$$MRR = V_c \times f \times d \quad 2.1$$

di mana:

V_c = kecepatan potong (mm/menit),

f = feed rate atau kecepatan makan (mm/rev),

d = kedalaman potong (mm).

Semakin tinggi nilai MRR, maka proses pemotongan akan semakin cepat dan waktu pemesinan akan berkurang, yang berarti meningkatkan efisiensi produksi. Namun, peningkatan MRR tidak bisa dilakukan secara sembarangan karena berisiko menurunkan kualitas permukaan, mempercepat keausan alat, dan menimbulkan getaran (chatter) pada mesin (Kumar & Singh, 2018).

Dalam studi yang dilakukan oleh Thamizhmanii dkk. (2015), dijelaskan bahwa peningkatan MRR memang dapat mempercepat proses produksi, tetapi perlu adanya pengaturan yang tepat terhadap parameter pemotongan untuk menjaga keseimbangan antara kecepatan dan kualitas. Mereka juga menekankan pentingnya optimasi parameter menggunakan metode statistik seperti Taguchi untuk memperoleh hasil maksimal.

Penelitian lainnya oleh Prajapati dan Patel (2020) menyebutkan bahwa feed rate adalah parameter yang paling berpengaruh terhadap peningkatan MRR, diikuti oleh kedalaman potong. Dengan peningkatan feed rate yang tepat, MRR bisa meningkat hingga 30% tanpa memengaruhi kekasaran permukaan secara signifikan, asalkan pemilihan alat potong dan kecepatan spindle juga sesuai.

Dalam praktiknya, pemilihan parameter pemotongan sangat tergantung pada jenis material benda kerja, jenis alat potong, serta kekakuan mesin. Misalnya, pemesinan aluminium memungkinkan MRR yang lebih tinggi dibandingkan baja karena sifat materialnya yang lebih lunak dan mudah dipotong. Oleh karena itu, MRR bukan hanya fungsi dari mesin, tetapi juga dari sistem keseluruhan (work-tool-machine).

Dengan memahami konsep MRR secara menyeluruh, operator dan engineer CNC dapat melakukan optimasi yang signifikan terhadap efisiensi pemesinan. Di dunia industri saat ini, efisiensi ini sangat dibutuhkan untuk menekan biaya produksi, meningkatkan output, dan memperpanjang umur alat potong. Oleh karena itu, MRR menjadi salah satu parameter penting dalam setiap kajian peningkatan produktivitas di lini manufaktur.

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Material Removal Rate (MRR) dalam Milling 3-Axis

Material Removal Rate (MRR) adalah parameter penting dalam proses pemesinan karena menunjukkan volume material yang dihilangkan dalam satuan waktu, biasanya dinyatakan dalam mm^3/menit . Dalam proses CNC milling 3-axis, peningkatan MRR berkontribusi langsung terhadap efisiensi produksi dan pengurangan waktu siklus. Namun, untuk mencapai MRR yang optimal, sejumlah faktor proses harus diperhatikan dan dikendalikan dengan cermat.

2.6.1. Kecepatan Potong (Cutting Speed)

Kecepatan potong atau spindle speed mempengaruhi laju interaksi antara alat potong dan benda kerja. Peningkatan kecepatan potong umumnya meningkatkan MRR, namun berisiko menimbulkan keausan alat lebih cepat jika tidak disesuaikan dengan material dan kondisi pemotongan. Menurut Kumar dan Singh (2018), peningkatan kecepatan spindle dari 800 rpm ke 1200 rpm menunjukkan peningkatan MRR yang signifikan pada aluminium, namun dengan peningkatan suhu yang perlu dikontrol melalui pendinginan (Kumar & Singh, 2018).

2.6.2. Kecepatan Makan (Feed Rate)

Feed rate atau laju pemakanan alat potong ke dalam material berbanding lurus dengan MRR. Namun, nilai feed yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas permukaan dan bahkan kerusakan pada pahat. Dalam

penelitian Prajapati dan Patel (2020), feed rate terbukti sebagai parameter paling dominan dalam peningkatan MRR untuk aluminium 6061 (Prajapati & Patel, 2020).

2.6.3. Kedalaman dan Lebar Potong (Depth and Width of Cut)

Kedalaman potong (depth of cut) dan lebar potong (width of cut) berperan langsung terhadap volume material yang dikerjakan per satuan waktu. Studi oleh Kumar dan Singh (2018) menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman potong dari 0.5 mm ke 1.5 mm mampu meningkatkan MRR hingga 40%, tetapi juga meningkatkan beban mekanis dan termal pada sistem pemotongan (Kumar & Singh, 2018).

2.6.4. Jenis Material Benda Kerja

Sifat material seperti kekerasan, konduktivitas panas, dan kecenderungan membentuk built-up edge mempengaruhi kecepatan pemesian dan MRR. Aluminium sebagai material yang relatif lunak dan memiliki konduktivitas panas tinggi memungkinkan pemesian dengan kecepatan tinggi, sehingga menghasilkan MRR yang tinggi. Namun, sifatnya yang lengket juga menimbulkan tantangan pada alat potong (Kumar & Singh, 2018).

2.6.5. Jenis dan Geometri Pahat

Pahat dengan jumlah flutes yang lebih banyak dapat meningkatkan MRR dengan catatan bahwa chip space masih memadai. Geometri sudut heliks, radius ujung, dan jenis pelapis seperti TiAlN dapat meningkatkan ketahanan pahat serta memungkinkan parameter pemesian yang lebih agresif (Kalpakjian & Schmid, 2014).

2.6.6. Penggunaan Pendingin dan Pelumas (Coolant)

Pendinginan yang baik berfungsi untuk mengontrol suhu dan mencegah kerusakan alat akibat panas berlebih. Pada pemesian aluminium, penggunaan coolant sangat penting karena aluminium cenderung melekat pada pahat jika suhu tidak terkontrol (Boothroyd & Knight, 2006).

2.6.7. Kekakuan Mesin dan Sistem Pencekaman

Mesin dan sistem pencekaman yang kaku akan membantu menjaga stabilitas selama proses pemesinan berlangsung. Getaran (chatter) yang diakibatkan oleh sistem yang tidak rigid akan menurunkan kualitas hasil dan memaksa pengurangan MRR demi menjaga hasil permukaan tetap baik (Tlusty, 2000).

2.6.8. Strategi Jalur Pemotongan (Toolpath Strategy)

Strategi pemotongan seperti trochoidal milling, zig-zag atau spiral cutting dapat membantu mendistribusikan beban secara merata dan memungkinkan peningkatan MRR tanpa meningkatkan beban secara drastis pada titik tertentu. Penggunaan CAM software modern dapat membantu merancang jalur optimal untuk peningkatan efisiensi (Altintas et al., 2011).

2.7. Pengaruh Parameter Pemesinan

Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah mata potong pada pahat endmill dapat meningkatkan MRR. Dalam studi yang menggunakan mesin CNC router milling 3-axis, pahat dengan 4 mata potong menghasilkan sisa material rata-rata 3,3 gram, sementara pahat dengan 2 mata potong menghasilkan sisa material rata-rata 0,6 gram. Hal ini menunjukkan bahwa pahat dengan lebih banyak mata potong dapat menghilangkan material lebih efisien.

2.8. Optimasi MRR

Optimasi nilai Material Removal Rate (MRR) pada proses pemesinan aluminium sangat penting untuk meningkatkan produktivitas sekaligus efisiensi waktu produksi. MRR adalah ukuran seberapa cepat material dapat dihilangkan selama proses pemesinan, dan nilai ini dipengaruhi oleh parameter utama seperti kecepatan spindel (spindle speed), kecepatan pemakanan (feed rate), kedalaman potong (depth of cut), serta jenis pahat yang digunakan. Pada material seperti aluminium, yang tergolong logam non-ferrous dengan karakteristik lunak dan konduktivitas panas tinggi, pemilihan parameter yang

tepat sangat memengaruhi hasil akhir dan umur pahat (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Penggunaan mesin CNC Milling 3-axis memungkinkan kontrol yang presisi terhadap parameter-parameter tersebut. Untuk mencapai nilai MRR yang optimal tanpa mengorbankan kualitas permukaan dan presisi dimensi, pendekatan eksperimental seperti metode Taguchi atau Response Surface Methodology (RSM) dapat digunakan. Melalui percobaan terkontrol dan analisis statistik, kombinasi parameter optimal dapat ditentukan, misalnya dengan menaikkan feed rate namun tetap menjaga kecepatan spindel dalam batas aman untuk mencegah terjadinya getaran atau keausan pahat yang berlebihan (Montgomery, 2017). Pendekatan ini juga mempermudah identifikasi faktor-faktor paling berpengaruh dalam meningkatkan efisiensi proses.

Selain itu, pemilihan jenis pahat yang sesuai dengan karakteristik aluminium juga menjadi faktor penting. Pahat dengan sudut rake positif, lapisan pelapis khusus (seperti TiN atau DLC), serta sistem pendingin yang efektif dapat membantu mengurangi gaya pemotongan dan meningkatkan pembuangan chip (Groover, 2010). Dengan mengintegrasikan pengaturan parameter pemesinan yang tepat dan pemilihan tooling yang optimal, proses milling pada mesin CNC 3-axis dapat menghasilkan nilai MRR yang tinggi tanpa menurunkan kualitas produk, sehingga mendukung proses produksi yang lebih cepat dan ekonomis.

2.7. Variabel Proses

Parameter pemotongan pada proses bubut, yaitu parameter pemotongan pada proses pembubutan, merupakan informasi berupa perhitungan dasar, rumus dan tabel yang menjadi dasar dari teknologi proses pemotongan/pemisahan, termasuk pada mesin bubut. Parameter pemotongan dalam proses pembubutan meliputi:

kecepatan putaran spindel dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$RPM = \frac{vc \cdot 1000}{\pi d} \quad 2.2$$

Dimana

rpm = kecepatan spindel (rpm)

vc = kecepatan potong(m/menit)

d = diameter benda kerja (mm)

π = putaran benda kerja (putaran/menit)

2.8. Gerak Makan

Kecepatan pemakanan ditentukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor antara lain kekerasan bahan, kedalaman potong, sudut potong alat potong, bahan alat potong, ketajaman alat potong dan kesiapan operasional mesin. Kesiapan mesin ini dapat diartikan seberapa besar kemampuan mesin untuk membantu mencapai feed rate yang optimal. Terlepas dari pertimbangan ini, laju umpan umumnya ditetapkan pada laju umpan tinggi untuk proses pengasaran karena tidak memerlukan permukaan yang halus (waktu putar lebih cepat), dan laju umpan rendah digunakan untuk proses finishing untuk mencapai pemotongan yang lebih baik. kualitas sehingga hasilnya halus (waktu pengerjaan lebih cepat). Besarnya laju pemakanan pada mesin bubut ditentukan dengan perpindahan pahat 10 bubut (f) dalam mm/putaran dikalikan dengan putaran mesin (n) dalam satuan putaran.

2.9. Kecepatan Putaran Spindel pada CNC Milling

Kecepatan putaran spindel (spindle speed) merupakan salah satu parameter paling penting dalam proses pemesinan menggunakan mesin CNC Milling. Spindel adalah komponen utama yang berfungsi memutar alat potong (tool), dan kecepatannya dinyatakan dalam satuan rotasi per menit (RPM). Pemilihan nilai RPM yang tepat bergantung pada jenis material benda kerja, diameter pahat, serta sifat pemotongan yang diinginkan. Kecepatan putar yang

terlalu rendah dapat menyebabkan proses pemotongan berjalan lambat dan permukaan benda kerja menjadi kasar. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan panas berlebih, mempercepat keausan pahat, dan bahkan merusak komponen mesin (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Dalam praktiknya, kecepatan spindel dihitung dengan rumus berikut:

$$n = \frac{1000 \cdot v \cdot \pi \cdot D}{n \cdot D} \quad 2.3.$$

di mana

n adalah kecepatan spindel (RPM),

v adalah kecepatan potong (cutting speed) dalam meter per menit (m/min)

D adalah diameter pahat dalam milimeter.

Untuk material seperti aluminium, kecepatan potong yang direkomendasikan berkisar antara 150 hingga 300 m/min, tergantung pada jenis pahat dan sistem pendingin yang digunakan (Groover, 2010). Mesin CNC modern memungkinkan pengaturan putaran spindel secara otomatis melalui program G-code, yang sangat membantu dalam proses pemesinan presisi tinggi.

Pemilihan kecepatan spindel yang optimal bukan hanya berdampak pada kualitas permukaan hasil potong, tetapi juga pada umur pahat dan efisiensi waktu kerja. Oleh karena itu, parameter ini harus disesuaikan secara cermat berdasarkan eksperimen atau referensi material yang digunakan. Beberapa pendekatan seperti tabel cutting speed, perangkat lunak CAM, hingga sensor monitoring digunakan untuk menyesuaikan kecepatan spindel secara dinamis selama proses berlangsung (Suhardi dkk., 2020). Dengan pemahaman yang baik terhadap karakteristik material dan parameter proses, pengguna mesin CNC dapat mengoptimalkan kecepatan spindel untuk mencapai hasil yang maksimal secara teknis dan ekonomis.

2.10. Kedalaman Pemotongan

Kedalaman potong adalah tebal benda kerja yang dikeluarkan atau

dipotong dari benda kerja, atau jarak antara permukaan potong dengan permukaan benda kerja yang belum dipotong. Ketika pahat memotong hingga kedalaman (a), diameter benda kerja berkurang $2A$ karena permukaan benda kerja yang akan dipotong berbentuk silinder pada dua sisi karena benda kerja yang berputar. Kedalaman pemotongan dapat ditentukan oleh operator sesuai dengan hasil yang direncanakan sebelumnya sesuai dengan kemampuan pahat dan benda kerja yang akan dipotong

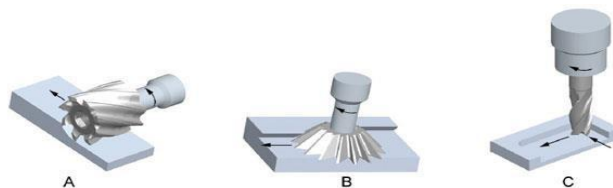
2.11. Mesin Micromil CNC Miling

Mesin micromill CNC milling pada dasarnya menggunakan sistem persumbuan koordinat kartesius, prinsipnya meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan pahat berputar dan bergerak ke atas dan kebawah. Untuk arah persumbuan mesin ini digunakan lambang sebagai berikut :

1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kanan dan ke kiri
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau kedepan dan ke belakang
3. Sumbu Z untuk arah gerakan vertikal atau keatas dan kebawah

2.12. Macam Pemakanan Pada Mesin Milling

Berdasarkan dari arah pemakanan, jenis pahat, dan posisi relatif pahat terhadap benda kerja mesin milling dibagi menjadi 3 jenis, yaitu slab milling, face milling, dan end milling.



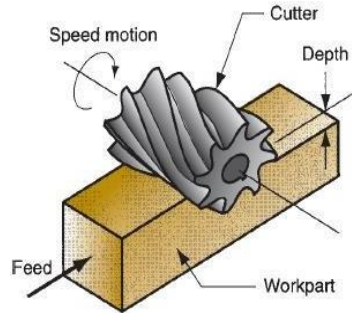
Gambar 2.13 A. Slab Milling, B. Face Milling, C. End Milling

Sumber: Nuffield Engineering Supplies (2012)

2.12.1. Slab Milling

Proses slab milling dimana permukaan yang benda kerja dihasilkan oleh gigi pisau yang terletak pada permukaan luar badan alat potongnya. Sumbu

dari putaran pisau 8 biasanya pada bidang yang sejajar dengan permukaan benda kerja yang disayat. (Rochim 1985:16).

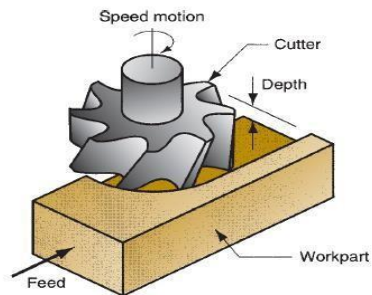


Gambar 2.14. Slab Milling

Sumber: Groover (2012:567)

2.12.2 Face Milling

Pada proses face milling, pisau dipasang pada spindel yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Permukaan hasil proses face milling dihasilkan dari hasil penyayatan oleh ujung dan selubung pisau. (Rochim 1985:16).

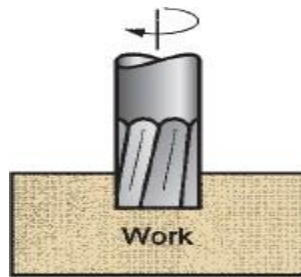


Gambar 2.15. Face Milling

Sumber: Groover (2012:567)

2.13.2. End Milling

Pisau pada proses end milling biasanya berputar pada sumbu yang tegak lurus permukaan benda kerja. Pisau dapat digerakkan menyudut untuk menghasilkan permukaan menyudut. Gigi potong pada pisau terletak pada selubung pisau dan ujung badan pisau. (Rochim 1985:16).



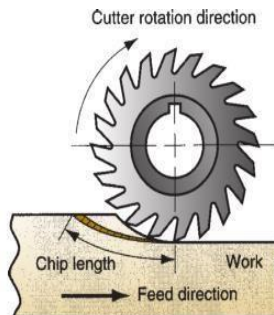
Gambar 2.16. End milling

Sumber: Groover (2012:567)

2.14. Arah Pemotongan Mesin Milling

Menurut arah pemakanan dengan araha cutter teeth pada proses milling dibagi menjadi 2 bentuk, yaitu:

A. Up Milling atau yang bisa juga disebut conventional milling, dimana arah pemakanan berlawanan arah dengan arah cutter teeth, ketika teeth memotong benda kerja.



Gambar 2.17. Up Milling atau Conventional Milling

Sumber: Groover (2012:567)

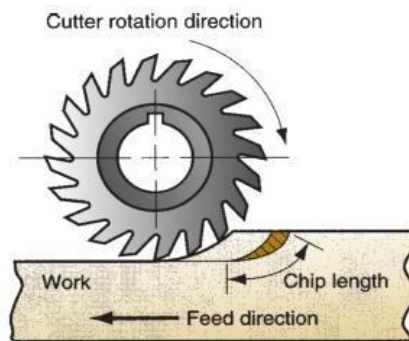
Persamaan teoritis untuk mengetahui ketebalan chip yang dihasilkan pada proses up milling adalah sebagai berikut: 10

$$tc = ft \cdot \sin(\Phi + \alpha) \quad 2.4.$$

Dimana :

α : rake angle

Down milling atau yang bisa juga disebut climb milling, dimana arah pemakanan searah dengan cutter teeth, ketika teeth memotong benda kerja.



Gambar 2.18. Down Milling atau Climb Milling

Sumber: Groover (2012:567)

Persamaan teoritis untuk mengetahui ketebalan chip yang dihasilkan pada proses up milling adalah sebagai berikut:

$$tc = ft \cdot \sin\Phi \quad 2.5.$$

Dimana :

t_o : tebal chip

f_t : feed per tooth

Φ : cutting effective angle

Arah pemotongan berbeda, sehingga hasil geometri pemotongan akan berbeda pula. Pada up milling, geram atau chip yang dihasilkan akan berbentuk memanjang. Sedangkan pada down milling, geram atau chip yang dihasilkan akan berbentuk lebih pendek dibandingkan dengan arah pemotongan up milling

2.15. Jenis-jenis Pahat dalam Permesinan Pada Cnc Milling

Jenis-Jenis Pahat CNC Milling:

2.15.1. End Mill Cutter

Ini adalah jenis pahat paling umum dalam CNC Milling. Pahat ini memiliki gigi potong di bagian samping dan ujung bawahnya, sehingga dapat digunakan untuk pemotongan vertikal maupun horisontal. Tersedia dalam berbagai bentuk (flat, ball-nose, corner radius) dan jumlah flutes.

2.15.2. Face Mill Cutter

Digunakan untuk pemotongan permukaan (face milling) dengan area kontak yang lebih luas. Pahat ini memiliki insert yang dapat diganti dan biasanya dipasang secara horizontal di kepala spindel. Cocok untuk meratakan permukaan benda kerja secara cepat.

2.15.3. Ball Nose Cutter

Ujung pahat berbentuk setengah bola, digunakan untuk membuat kontur 3D, lekukan, dan permukaan kompleks. Sangat umum dipakai pada proses finishing cetakan (mold & die).

2.15.4. Slot Mill / Slitting Cutter

Pahat pipih dan tipis, digunakan untuk membuat alur (slot) atau pemotongan sempit. Biasanya digunakan pada material tipis atau bagian sempit yang memerlukan presisi tinggi.

2.15.5. Chamfer Mill

Digunakan untuk membuat bevel atau chamfer di sudut benda kerja, umumnya sebelum proses finishing atau perakitan. Juga dapat digunakan untuk deburring (menghilangkan tajam).

2.15.6. Thread Mill Cutter

Untuk membuat ulir dalam (internal thread) dan luar (external thread). Kelebihannya dibanding tapping adalah dapat digunakan pada berbagai ukuran ulir dengan satu jenis cutter.

2.15.7. Fly Cutter

Cutter dengan satu mata potong yang digunakan untuk memotong permukaan lebar dengan kecepatan rendah. Efektif untuk finishing permukaan datar.

2.15.8. Insert Type Milling Cutter

Cutter besar yang menggunakan insert (mata potong kecil yang bisa diganti). Lebih ekonomis karena tidak perlu mengganti seluruh pahat jika hanya insert yang aus.

2.16. Aluminium

Aluminium adalah logam ringan yang memiliki sifat lunak, tahan korosi, dan memiliki konduktivitas termal serta listrik yang baik. Aluminium merupakan elemen kimia dengan simbol Al dan nomor atom 13, ditemukan dalam berbagai bentuk senyawa di alam, seperti bauksit, yang menjadi bahan utama dalam produksi aluminium. Karena sifatnya yang ringan, tahan lama, dan mudah dibentuk, aluminium banyak digunakan dalam berbagai industri, seperti konstruksi, transportasi, dan kemasan.

Selain itu, aluminium juga memiliki kelebihan diantaranya massa jenisnya yang rendah, kemampuan menahan korosi, harga yang murah, konduktor listrik dan panas yang baik, serta ketahanan oksidasi. Penggunaan aluminium di dunia industri perkapalan digunakan untuk menunjang proses fabrikasi dan telah banyak diterapkan oleh berbagai perusahaan material. Dalam industri-industri kecil, penggunaan aluminium tidak serta-merta menggunakan 100% aluminium murni, yang notabene harga beli bahan baku tersebut yang mahal, untuk itu cara mengakali biaya produksi yaitu dengan memanfaatkan limbah aluminium yang ada. (Aziz A.A dkk, 2017)

2.17. Jenis-jenis Aluminium

Aluminium dibagi menjadi 69dua kategori utama, yaitu aluminium murni dan aluminium paduan. Berikut adalah penjelasan detailnya:

1. Aluminium Murni (Aluminium Pure)

➤ Ciri-ciri:

- Kandungan aluminium $\geq 99\%$.
- Lebih lunak dibandingkan paduannya.
- Konduktivitas listrik dan termal sangat baik.
- Tahan korosi tinggi.

➤ Penggunaan:

Kabel listrik, pembungkus makanan (aluminium foil), dan peralatan rumah tangga.

2. Aluminium Paduan (Aluminium Alloy)

Paduan aluminium dibuat dengan mencampur logam lain seperti tembaga, magnesium, mangan, silikon, atau seng untuk meningkatkan kekuatan dan karakteristik tertentu.

a. Aluminium Seri 1000 (Murni)

- Ciri-ciri: Aluminium dengan kemurnian tinggi, seperti 1100.
- Keunggulan: Tahan korosi sangat baik.
- Penggunaan: Industri kimia, wadah makanan, dan reflektor.

b. Aluminium Seri 2000 (Paduan Tembaga)

- Ciri-ciri: Paduan dengan tembaga sebagai elemen utama.
- Keunggulan: Sangat kuat tetapi tahan korosi rendah.
- Penggunaan: Struktur pesawat terbang dan kendaraan militer.

c. Aluminium Seri 3000 (Paduan Mangan)

- Ciri-ciri: Paduan dengan mangan.
- Keunggulan: Tahan korosi tinggi, kekuatan sedang.
- Penggunaan: Tangki penyimpanan dan atap bangunan.

d. Aluminium Seri 4000 (Paduan Silikon)

- Ciri-ciri: Paduan dengan silikon.
- Keunggulan: Tahan aus dan cocok untuk aplikasi suhu tinggi.

- Penggunaan: Komponen otomotif seperti piston.

e. Aluminium Seri 5000 (Paduan Magnesium)

- Ciri-ciri: Paduan dengan magnesium.
- Keunggulan: Tahan korosi air laut, kuat, dan ringan.
- Penggunaan: Kapal laut, tangki bahan bakar, dan konstruksi.

f. Aluminium Seri 6000 (Paduan Magnesium dan Silikon)

- Ciri-ciri: Kombinasi magnesium dan silikon.
- Keunggulan: Kombinasi kekuatan, korosi, dan kemudahan fabrikasi

yang baik.

- Penggunaan: Struktur jembatan, bingkai sepeda, dan konstruksi umum.

g. Aluminium Seri 7000 (Paduan Seng)

- Ciri-ciri: Paduan dengan seng dan kadang tembaga.
- Keunggulan: Sangat kuat tetapi korosi rendah.
- Penggunaan: Industri pesawat terbang dan peralatan olahraga.

Aluminium daur ulang menawarkan banyak keunggulan, seperti efisiensi energi, ramah lingkungan, dan penghematan biaya, menjadikannya pilihan yang berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan aluminium global. Namun, tantangan seperti pemisahan material dan kualitas bahan baku perlu diatasi untuk memaksimalkan manfaatnya. Dengan teknologi yang terus berkembang, aluminium daur ulang dapat menjadi solusi yang lebih efisien dan ekonomis di masa depan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

1.1. Tempat Dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan digedung Laboratorium CNC,CAD/CAM dan Automasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Tadulako, sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk pelaksanaan kegiatan penelitian ini adalah dari mulai dari bulan Januari 2025 sampai dengan Maret 2025.

1.2. Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen. Pemilihan metode eksperimen dilakukan karena dapat menghasilkan data yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan. Penelitian ini melibatkan eksperimen pengefraisan benda uji dengan variasi kecepatan putaran spindel, kedalaman pemakanan, dan kecepatan pemakanan.

1.3. Variabel Penelitian

3.2.1. Variabel Bebas

1. FEEDREAD: 100,200 DAN 300 mm/min
2. Depth of cut: 03,05,07 dan 1 (mm)

3.2.2. Variabel Terkontrol

Mencari nilai material removal rate (MRR)

3.2.3. Variabel Terikat

1. Pahat yang digunakan HSS
2. Spindle speed (1200 rpm)
3. Mesin CNC yang digunakan adalah mesin CNC milling 3-axis
4. Diameter pahat (\varnothing 10 mm)
5. Material benda kerja Alumunium 6061

5.1. Alat Dan Bahan

5.1.1. Alat Yang Digunakan

1. Mesin Milling CNC

Mesin yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin CNC Milling (Computer Numerical Control) model SK20 dengan ukuran meja 700 X 180 mm. Dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1. Milling CNC Machine Model SK20

6. Jangka Sorong

Jangka sorong berfungsi untuk mengukur diameter spesimen dan tebal benda kerja. Dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut :



Gambar 3.3. Jangka Sorong

3.4.2. Bahan Penelitian

1. Alumunium 6061

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Almunium 6061. Bahan aluminium diuji di mesin cnc miling:



Gambar 3.4. Alumunium 6061

7. Mata Pahat HSS (High-Speed Steel)

Mata Pahat HSS ENDMILL digunakan untuk melakukan pemotongan material. Jenis pahat HSS dipilih karena memiliki tingkat kekerasan yang cukup tinggi, memungkinkan penggunaan pada suhu tinggi dan mudah untuk diasah ulang. Dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.5 . Mata Pahat (HSS END MILLS).

4F 10×10×22×72

8. Timbangan Digital

Timbangan digital adalah alat ukur yang akurat untuk mengukur berat suatu benda. Dalam pemesinan, timbangan digital digunakan untuk mengukur berat chip atau bram2 yang dihasilkan dari proses pemesinan.

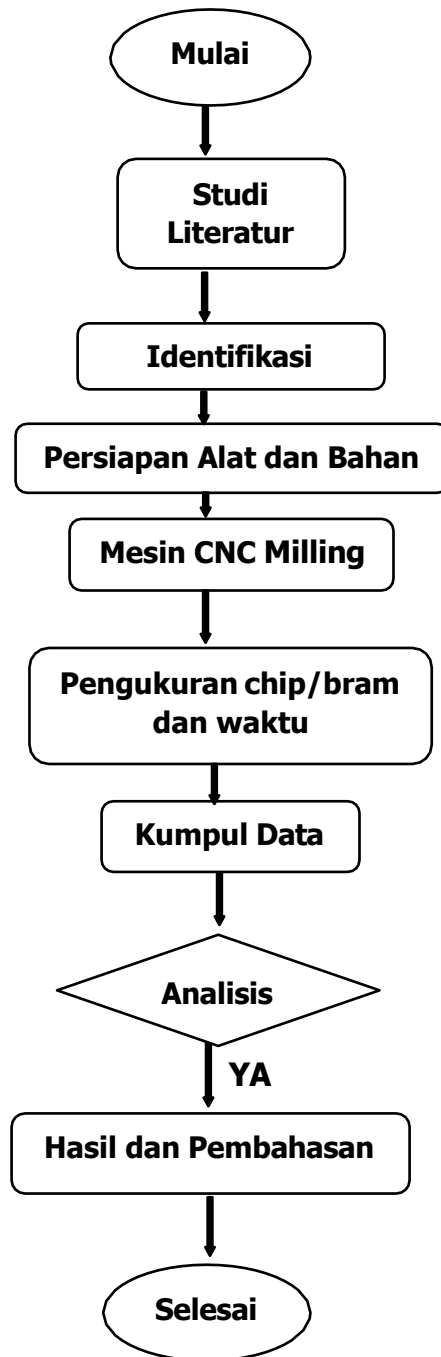


Gambar 3.6. Timbangan Digital

1.1 Langkah Pengerjaan Mesin CNC MILLING

1. Mempersiapkan benda kerja Aluminium
2. Menyiapkan alat ukur timbangan digital dan stop wat
3. Hidupkan Switch on-off.
4. Pengaturan posisi pisau milling pada koordinat X, Y, Z pada koordinat 0 (nol).
5. Setting alat benda kerja.
6. Memasukkan program pada mesin CNC milling.
7. Setelah memasukkan program ke dalam mesin CNC milling langkah selanjutnya adalah melakukan pemeriksaan pada program yaitu melakukan simulasi apakah terjadi kesalahan pemograman atau tidak, bila terjadi kesalahan maka harus dilakukan pemeriksaan pada program agar diketahui letak kesalahannya.

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.6. Diagram Alir

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Tabel Hasil Penelitian

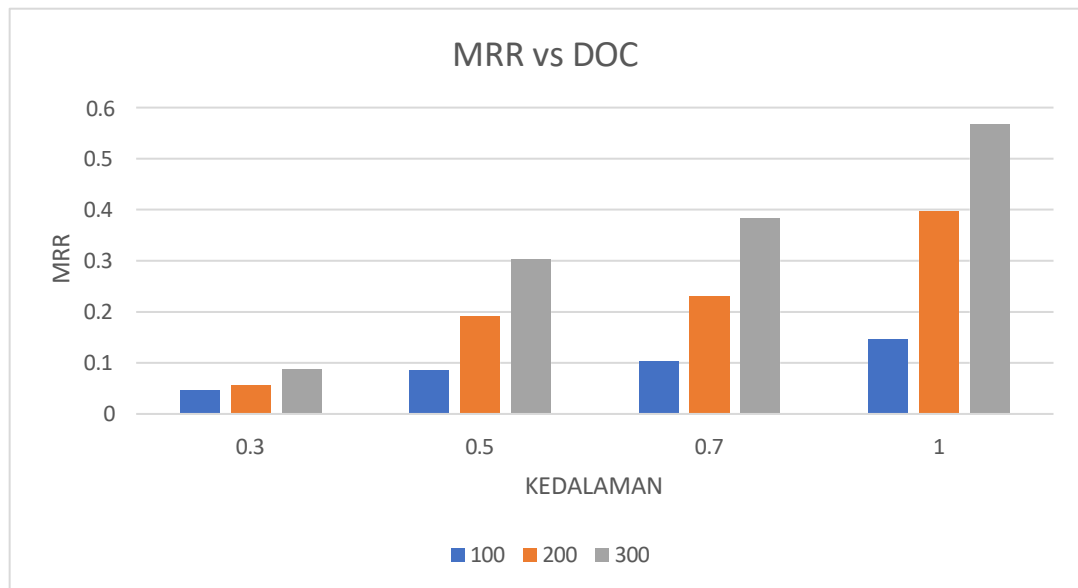
Penelitian ini melibatkan proses pemesinan menggunakan CNC milling pada material hasil alumunium 6061 dengan menggunakan mata pahat HSS. Variasi kedalaman pemakanan(0,3 mm, 0,5 mm,0,7 mm dan 1 mm), dan kecepatan pemakanan (100 mm/min, 200 mm/min dan 300 mm/min). pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali yang di titik dan Material Removal Rate (MRR) atau laju penghilangan material adalah ukuran seberapa cepat suatu proses pemesinan dapat menghilangkan dari benda kerja. MRR dinyatakan dalam satuan volume persatuan waktu, seperti mm/ min atau cm/min. semakin cepat proses permesinan selesai dan spesimen disajikan pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1 Data hasil pengukuran Material Removal Rate (MRR) pada pahat dan lebar pemakanan

Depth of Cut	Feed Rate (mm/min)	Massa	volume	Waktu (menit)	MRR
0.3	100	0.14	0.051851852	1.116666667	0.046434494
	200	0.12	0.044444444	0.8	0.055555556
	300	0.13	0.048148148	0.55	0.087542088
0.5	100	0.27	0.1	1.166666667	0.085714286
	200	0.276	0.102222222	0.533333333	0.191666667
	300	0.3	0.111111111	0.366666667	0.303030303
0.7	100	0.33	0.122222222	1.183333333	0.103286385
	200	0.34	0.125925926	0.55	0.228956229

	300	0.345	0.1277777778	0.3333333333	0.3833333333
1	100	0.53	0.196296296	1.35	0.145404664
	200	0.535	0.198148148	0.5	0.396296296
	300	0.536	0.198518519	0.35	0.567195767

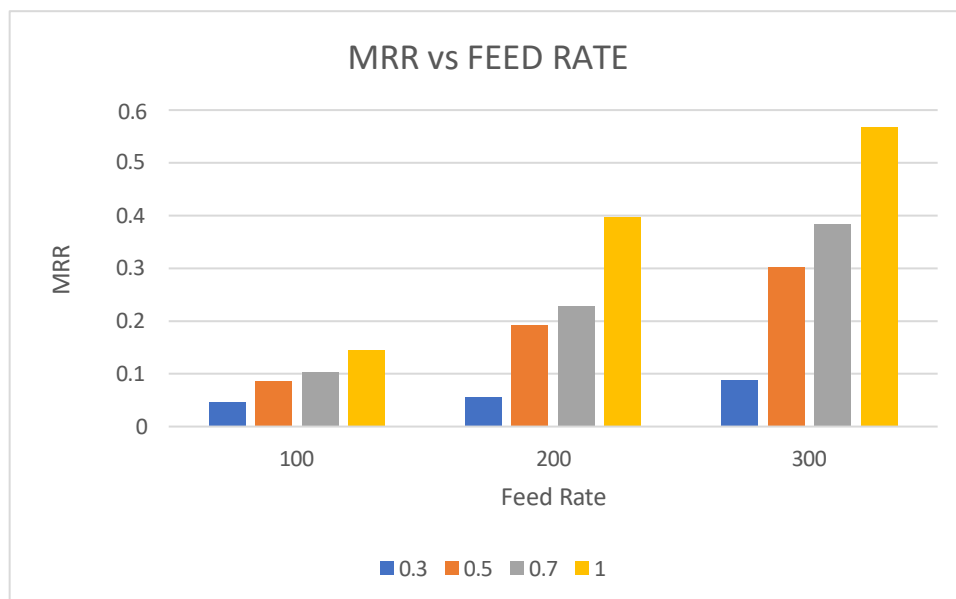
Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengukuran depth of cut pada material remove rate (MRR) Pada proses permesinan CNC Milling dengan kecepatan spindel konstan berada di 1200 RPM Dengan variasi kedalaman pemakanan 0.5 mm, 0.3 mm, 0.7 mm dan 1 mm dan kecepatan pemakanan 100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min. dari tabel diatas didapatkan grafik hubungan antara daphth of cut dengan kecepatan spindel pemakanan pada material almunium 6061, yang bisa dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 Grafik material remove rate (MRR) waktu pemakanan

Berdasarkan pada Grafik gambar 4.1 Maka MRR Terhadap Kedalaman Potong Grafik (Depth Of Cut) dengan ada laju penghilangan MATERIAL REMOVEL RATE (MRR) maka pada tiga variasi kecepatan pemakanan (FeedRate) maka itu 100 mm/min, 200 mm/min dan 300 mm/min. maka pada kedalaman 0.3 mm Kedalaman pemotongan yang rendah menghasilkan volume material yang

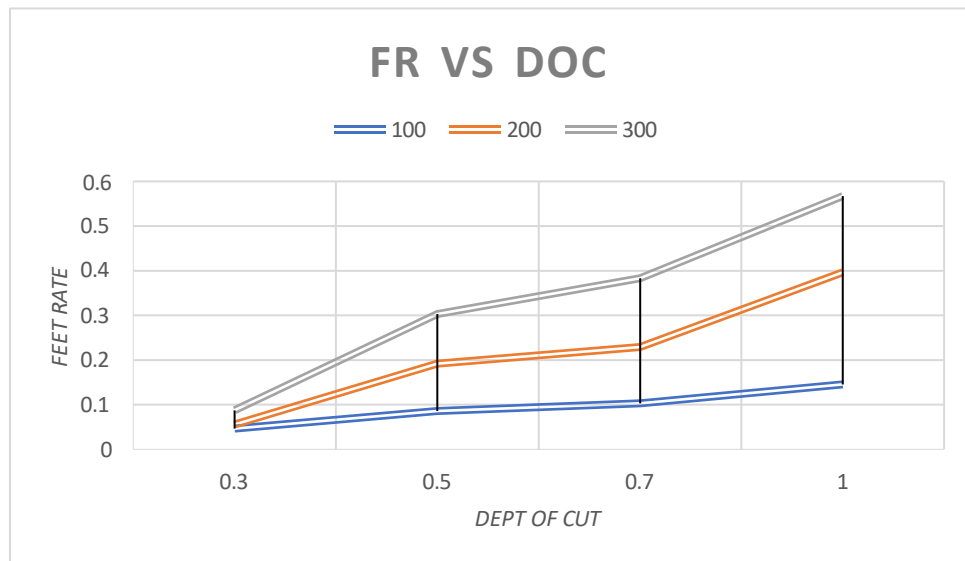
terpotong sedikit pada FEEDRATE 300 mm/min, pada kedalaman 0.5 mm memiliki Penambahan kedalaman memperluas area pemotongan, mendorong efisiensi penghilangan material pada FeedRate 300 mm/min. Kedalaman 0.7 mm Tren kenaikan tetap konsisten, menunjukkan bahwa pemotongan lebih dalam secara linear meningkatkan produktivitas pada FEEDRATE 300 mm/min dan pada kedalaman terakhir yaitu 1 mm maka memperlihatkan Kedalaman maksimal menghasilkan kinerja optimal, meskipun batasan teknis (seperti keausan alat) perlu dipertimbangkan pada FeedRate 300 mm/min.



Gambar 4.2 Grafik material removal rate (MRR) Feet Rate

Berdasarkan pada Gambar 4.2 DI tampilkan MRR terhadap Feedrate dapat diamati hubungan grafik ini menggambarkan bagaimana MRR maka berubah seiringnya variasi Feedrate (100 mm/min, 200 mm/min dan 300 min/min) untuk mendapatkan setiap nilai kedalaman Pada FEEDRATE 100 mm/min DEPTH OF CUT 0.3 mm kurang memberikan kontribusi optimal terhadap efisiensi pemotongan dan pada FEEDRATE 300 mm/min. pada FEEDRATE 300 mm/min DEPTH OF CUT 0.5 mm mulai menunjukkan potensi efisiensi, terutama pada FEEDRATE sedang sehingga tinggi pada FEEDRATE

300 mm/min DEPTH OF CUT 0.7 mm kedalaman potong ini menghasilkan efisiensi menengah yang stabil dan cocok untuk proses yang lebih moderat. Dan pada FEEDRATE 300 MM dan DEPTH OF CUT 1 mm merupakan yang paling efektif dalam menghasilkan efisiensi maksimal, terutama jika dikombinasikan dengan FEEDRATE tinggi



Gambar 4.3 grafik Penghubung MRR Waktu Dan Feet Rate

Berdasarkan pada gambar 4.3 pada grafik garis MRR terhadap Feedrate grafik ini memperlihatkan tren peubahan pada MRR terhadap Feedrate untuk sebaik macam kedalaman potong. Pada DEPTH OF CUT 0.3 mm di FEEDRATE 100 mm/min maka kedalaman terkecil ini menunjukan paling rendah. Meskipun ada peningkatan seiring naiknya FEEDRATE, nilai efisensinya masih sangat terbatas. Pada DEPTH OF CUT 0.5 mm di FEEDRATE 300 mm/min pada kedalaman ini, terjadi peningkatan signifikan dalam nilai resio, terutama saat menggunakan FEEDRATE yang lebih tinggi. Efisiensi mulai terlihat jelas. Pada FEEDRATE 300 mm/min DEPTH OF CUT 0.7 mm resio terus meningkat dan secara stabil performanya cukup tinggi, mendapatkan efisiensi yang baik untuk proses yang lebih agresif. Dan pada FEEDRATE 300 mm/min DEPTH OF CUT 1 mm ini adalah kedalaman dengan hasil terbaik di seluruh grafik. Kombinasi

antara DEPTH OF CUT yang besar dan FEEDRATE tinggi memberikan performa paling optimal.

Berdasarkan dari 3 Grafik diatas yaitu ada beberapa penjelasan dari Dari ketiga grafik yang ditampilkan, dapat diketahui bahwa peningkatan kedalaman pemotongan berdampak signifikan terhadap kenaikan nilai Material Removal Rate (MRR) pada proses CNC Milling 3-Axis. Semakin besar kedalaman potong yang digunakan, semakin tinggi pula MRR yang dihasilkan, karena volume material yang diangkat menjadi lebih banyak dalam waktu yang sama.

Nilai MRR tertinggi diperoleh pada kedalaman pemotongan 1 mm untuk semua variasi kecepatan pemakanan, sedangkan nilai MRR terendah muncul pada kedalaman pemotongan 0.3 mm. Hal ini menunjukkan bahwa depth of cut sangat mempengaruhi banyaknya material yang terangkat.

Kenaikan MRR paling signifikan terjadi pada kecepatan pemakanan 300 mm/min, di mana perubahan depth of cut menunjukkan peningkatan MRR yang lebih besar dibandingkan dengan feed rate 100 mm/min dan 200 mm/min.

Perbedaan nilai MRR pada setiap kedalaman pemotongan cenderung konsisten di semua kecepatan pemakanan, namun pada feed rate lebih tinggi, selisih MRR antar depth of cut menjadi semakin mencolok.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semakin besar kedalaman pemotongan, semakin tinggi produktivitas proses pemesinan. Namun demikian, faktor keausan pahat dan kualitas permukaan benda kerja tetap harus diperhatikan agar proses machining tetap efisien dan menghasilkan kualitas yang baik.

4.3 Pembahasan

Pengaruh Depth of Cut terhadap MRR Pada grafik batang pertama dan kedua, terlihat bahwa peningkatan depth of cut dari 0.3 mm menjadi 1 mm berbanding lurus dengan kenaikan nilai MRR. Semakin besar kedalaman

pemotongan, maka semakin banyak material yang terangkat, sehingga nilai MRR ikut bertambah. Hal ini sesuai dengan teori dasar proses pemesinan yang menyatakan bahwa volume material yang disayat bertambah seiring bertambahnya depth of cut.

Dampak Feed Rate terhadap MRR Grafik garis ketiga menunjukkan bahwa seiring meningkatnya feed rate dari 100 mm/min hingga 300 mm/min, nilai MRR juga mengalami kenaikan pada semua variasi depth of cut. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan pemakanan merupakan faktor penting yang mempengaruhi jumlah material yang dipindahkan dalam proses pemesinan.

Kombinasi Parameter Depth of Cut dan Feed Rate Interaksi antara kedua parameter ini sangat mempengaruhi hasil akhir MRR. Feed rate tertinggi yaitu 300 mm/min menunjukkan lonjakan MRR paling signifikan di setiap variasi depth of cut dibandingkan feed rate 100 mm/min dan 200 mm/min. Dengan demikian, kombinasi penggunaan depth of cut dan feed rate yang tepat akan memberikan hasil MRR optimal.

Pertimbangan Efisiensi dan Kualitas Produk Meski MRR tinggi dapat mempercepat proses pemotongan, peningkatan nilai MRR secara berlebihan dapat menimbulkan efek negatif seperti keausan alat potong yang lebih cepat, getaran mesin, dan penurunan kualitas permukaan benda kerja. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengaturan parameter yang seimbang agar proses pemesinan tetap efisien tanpa mengurangi mutu hasil akhir.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan Material Removal Rate (MRR) waktu dan Mrr (Feed Red) permesinan CNC miling terhadap tingkat keksaran permukaan alumunium 6061 dapat ditarik kesimpulan:

1. Pengaruh Parameter Pemesinan terhadap MRR Variasi parameter pemesinan seperti kedalaman potong (depth of cut) dan laju pemakanan (feed rate) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya Material Removal Rate (MRR) pada proses CNC Milling 3 Axis. Semakin besar nilai kedalaman potong dan kecepatan pemakanan yang digunakan, maka MRR yang dihasilkan juga meningkat, sehingga proses pemesinan menjadi lebih cepat.
2. Keterkaitan MRR dengan Efisiensi Proses Pemesinan Peningkatan MRR sejalan dengan meningkatnya efisiensi proses pemesinan, di mana waktu pengerjaan dapat ditekan dan produktivitas meningkat. Namun demikian, jika MRR dibiarkan terlalu tinggi tanpa kendali yang tepat, dapat berdampak pada penurunan kualitas permukaan benda kerja serta mempercepat keausan pahat, sehingga keseimbangan parameter tetap perlu diperhatikan.
3. Penentuan Parameter Pemesinan yang Efisien Dari grafik yang dianalisis, kombinasi parameter dengan depth of cut sebesar 1 mm dan feed rate 300 mm/min mampu menghasilkan MRR tertinggi, sehingga meningkatkan efisiensi proses. Meskipun begitu, untuk menjaga kualitas hasil pemesinan dan menghindari kerusakan alat potong, diperlukan pengaturan parameter pemesinan yang optimal dengan mempertimbangkan kapasitas mesin, bahan benda kerja, serta kondisi alat potong.

5.2 SARAN

Untuk penelitian selanjut dengan metode serupa dengan harap lebih diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. enyesuaian Parameter Pemesinan yang Tepat Dalam proses CNC Milling 3 Axis, pemilihan parameter seperti kedalaman potong dan laju pemakanan hendaknya disesuaikan dengan karakteristik material benda kerja serta kondisi alat potong yang digunakan. Meski peningkatan parameter dapat mempercepat proses pemotongan melalui kenaikan MRR, tetap perlu diperhatikan efek sampingnya seperti peningkatan keausan pahat dan penurunan kualitas permukaan. Oleh karena itu, pengujian tambahan diperlukan untuk mendapatkan kombinasi parameter yang paling ideal agar efisiensi dan kualitas terjaga.
2. Penambahan Variabel Penelitian di Masa Depan Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menambahkan variabel lain seperti kecepatan spindle, jenis dan geometri pahat, sudut potong, maupun penggunaan pendingin (coolant) guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh parameter pemesinan terhadap MRR dan kualitas produk.
3. Pengukuran Kualitas Permukaan Sebaiknya penelitian di masa mendatang tidak hanya berfokus pada nilai MRR, tetapi juga melibatkan pengujian kekasaran permukaan (surface roughness) sebagai parameter kualitas hasil pemotongan. Hal ini dapat membantu dalam menentukan parameter pemesinan yang mampu menghasilkan efisiensi kerja tanpa mengurangi mutu permukaan benda kerja.
4. Pemanfaatan Teknologi Pendukung Penggunaan teknologi seperti software simulasi CNC atau alat sensor pemantau gaya potong dan getaran sangat disarankan untuk meningkatkan ketelitian data. Dengan alat ini, proses

pemesinan dapat dipantau secara real-time sehingga dapat mengurangi risiko kesalahan serta menjaga kestabilan MRR selama proses berlangsung.

Daftar Pustaka

- Kumar, S., & Singh, H. (2018). Optimization of material removal rate in CNC milling using Taguchi method. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(1), 125–132.
- Thamizhmanii, S., Hasan, S., & Raza, M. (2015). Study of material removal rate in CNC milling machine. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(12), 5613–5616.
- Prajapati, A., & Patel, R. (2020). Effect of machining parameters on MRR and surface roughness in CNC milling of Aluminium 6061. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1124–1129.
- Ezugwu, E.O., & Wang, Z.M. (1997). Titanium alloys and their machinability – a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3), 262–274.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S.R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th ed.). Pearson.
- Boothroyd, G., & Knight, W.A. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. CRC Press.
- Thusty, J. (2000). *Manufacturing Processes and Equipment*. Prentice Hall.
- Altintas, Y., et al. (2011). Virtual simulation and optimization of CNC machining processes. *CIRP Annals*, 60(2), 739–757.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th ed.). Pearson.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Zubaidi, A. (2012). Analisis Pengaruh Kecepatan Putar dan Kecepatan Pemakanan Terhadap Kekasaran Permukaan Material FCD 40.

- Widarto. (2008). Teknik Pemesin Untuk Sekolah Menengah Kejuruan Jilid 1.
Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Widarto. (2008). Teknik Pemesin Untuk Sekolah Menengah Kejuruan Jilid 2.
Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Kalpakjian & Steven R. Schmid.(2014). Manufacturing Engineering and Technology
- Mikell P. Groover (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems
- Douglas C. Montgomery (2017). Design and Analysis of Experiments
- Aziz, A. A., Kiryanto, K., & Santosa, A. W. B. (2017). Analisa Kekuatan Tarik, Kekuatan Tekuk, Komposisi dan Cacat Pengecoran Paduan Aluminium Flat Bar dan Limbah Kampas Rem dengan Menggunakan Cetakan Pasir dan Cetakan Hidrolik sebagai Bahan Komponen Jendela Kapal. Jurnal Teknik Perkapalan, 5 (1).
- Farokhi, M., & Sumbodo, W. (2017). Pengaruh Kecepatan Putar Spindle (RPM) dan Jenis Sudut Pahat Pada Proses Pembubutan Terhadap Tingkat Kekasaran Benda Kerja Baja EMS 45. J. Saintek, 15, 85-94.
- Manurung, M., & Ayuningtyas, I. F. (2010). Kandungan Aluminium dalam Kaleng Bekas dan pemanfaatannya dalam pembuatan Tawas. Jurnal Kimia, 4(2), 180-186.
- Anggi Saputra¹, Zaldy Kurniawan¹, Yudi Oktriadi. (2024).Variasi Parameter Proses Terhadap Pengujian Material Removal Rate dengan Mesin CNC Bubut pada Proses Finishing Baja SKD-11 Menggunakan RSM