

**PENGARUH *SPINDLE SPEED* DAN PENGAPLIKASIAN MAGNET
PADA PROSES *SLOT MILLING* MENGGUNAKAN MESIN
MICROMILL TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN
ALUMINIUM**

**SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**GHANI ILHAM ARIESTONO
NIM. 145060200111030**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH *SPINDLE SPEED* DAN PENGAPLIKASIAN MAGNET
PADA PROSES *SLOT MILLING* MENGGUNAKAN MESIN
MICROMILL TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN
ALUMINIUM**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



GHANI ILHAM ARIESTONO
NIM. 145060200111030

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 19 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.
NIK. 201605 860703 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 20012 1 001



JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH *SPINDLE SPEED* DAN PENGAPLIKASIAN MAGNET PADA PROSES *SLOT MILLING* MENGGUNAKAN MESIN *MICROMILL* TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN ALUMINIUM

Nama Mahasiswa : Ghani Ilham Ariestono

NIM : 145060200111030

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Produksi

KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.

Dosen Pembimbing II : Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.

Dosen Penguji II : Ir. Ari Wahjudi, MT.

Dosen Penguji III : Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE

Tanggal Ujian : 9 Juli 2018

SK Penguji : 1391/UN10.F07/SK/2018

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

Mahasiswa,



Ghani Ilham Ariestono
NIM. 145060200111030



RIWAYAT HIDUP

Ghani Ilham Ariestono, Berlin, 20 Februari 1995 anak dari Sony Ariestono dan Sri Wahyuni, SD sampai SMA di Kota Jakarta lulus SMA tahun 2013, lulus program sarjana Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2018. Pengalaman kerja sebagai Asisten Laboratorium di Laboratorium Otomasi Manufaktur Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016 hingga 2018.

Malang, Juli 2018

Penulis



Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
4. Bapak Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama penyusunan skripsi.
5. Bapak Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT. Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan saran dan masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi.
6. Bapak Dr. Ir. Wahyono Soeprapto, MT.Met., Bapak Ir. Ari Wahjudi, MT., dan Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE selaku Dosen Penguji Ujian Skripsi/Komprehensif penulis yang sudah memberi saran dan masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi.

Sujud dan terima kasih yang dalam penulis persembakan kepada kedua orang tua tercinta, Sony Ariestono dan Sri Wahyuni, serta adik Iman Fajar Ariestono dan Muhammad Reza Ariestono atas dorongan yang kuat, kebijaksanaan, dan doa.

Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada:

1. Teman seperjuangan skripsi saya yaitu Darmawanzah Zalbie, Riski Fachrulan Asrul, Arief Rachmat, Raka Satria, dan Achmad Fauzi Praditya yang sudah saling membantu untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Giannina Deva Stevanie, yang tak hentinya memberikan motivasi, semangat, serta dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Keluarga Besar Asisten Laboratorium Otomasi Manufaktur, Bapak Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief MT. selaku Kepala Laboratorium, Bapak Hartono selaku Laboran dan seluruh teman-teman Asisten Laboratorium: Ray, Dwik, Della, Azlan, Kusdi, Firman,

Azzam, Adit, Riza, Asri, dan Azka yang sudah menjadi keluarga kecil yang selalu menemani dan memberikan semangat.

4. Teman-teman Teknik Mesin Universitas Brawijaya angkatan 2014 atas kenangan dan kebersamaan selama menempuh perkuliahan.

Malang, Juli 2018

Penulis



PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang senantiasa melimpahkan berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Pengaruh Spindle Speed dan Pengaplikasian Magnet pada Proses Slot Milling menggunakan Mesin Micromill terhadap Kekasaran Permukaan Aluminium**” sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

Skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik tanpa bantuan, bimbingan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
4. Bapak Dr. Ir. Achmad As’ad Sonief, MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama penyusunan skripsi.
5. Bapak Fikrul Akbar Alamsyah, ST., MT. Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan saran dan masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi.
6. Bapak Dr. Ir. Wahyono Soeprapto, MT.Met., Bapak Ir. Ari Wahjudi, MT., dan Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE selaku Dosen Penguji Ujian Skripsi/Komprehensif penulis yang sudah memberi saran dan masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi.
7. Kedua orang tua tercinta, Sony Ariestono dan Sri Wahyuni, serta adik Iiman Fajar Ariestono dan Muhammad Reza Ariestono yang selalu mendoakan dan memberikan motivasi selama perkuliahan dan penyelesaian skripsi ini.
8. Teman seperjuangan skripsi saya yaitu Darmawanzah Zalbie, Riski Fachrulan Asrul, Arief Rachmat, Raka Satria, dan Achmad Fauzi Praditya yang sudah saling membantu untuk menyelesaikan skripsi ini.
9. Giannina Deva Stevanie, yang tak hentinya memberikan motivasi, semangat, serta dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

10. Keluarga Besar Asisten Laboratorium Otomasi Manufaktur, Bapak Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief MT. selaku Kepala Laboratorium, Bapak Hartono selaku Laboran dan seluruh teman-teman Asisten Laboratorium: Ray, Dwik, Della, Azlan, Kusdi, Firman, Azzam, Adit, Riza, Asri, dan Azka yang sudah menjadi keluarga kecil yang selalu menemani dan memberikan semangat.
11. Teman-teman Teknik Mesin Universitas Brawijaya angkatan 2014 atas kenangan dan kebersamaan selama menempuh perkuliahan.
12. Seluruh pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah banyak membantu dan memberikan arahan selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat menghargai setiap kritik dan saran untuk penyusunan skripsi dengan lebih baik.

Akhir kata, penulis berharap laporan skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua sehingga dapat menjadi bahan acuan penelitian sebelumnya.

Malang, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Studi Terdahulu	5
2.2 Proses Manufaktur	5
2.3 Proses <i>Machining</i>	6
2.4 Mesin <i>Milling</i>	7
2.4.1 Parameter Pemotongan pada Proses <i>Slot-Milling</i>	8
2.4.2 <i>Micromill</i> CNC <i>Milling</i>	9
2.5 Kekasaran Permukaan	11
2.6 Getaran pada Proses Permesinan	13
2.6.1 <i>Regenerative Chatter</i>	15
2.6.2 Peredaman (<i>Damping</i>)	16
2.7 Magnet.....	17
2.7.1 Magnet Permanen	18
2.7.2 Magnet Permanen sebagai Peredam Getaran	18
2.8 Kerangka Penelitian.....	21
2.9 Hipotesis	22
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian	23
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	23
3.3 Variabel Penelitian.....	23
3.4 Alat dan Bahan	24
3.5 Dimensi Benda Kerja.....	28
3.6 Skema Penelitian	29
3.7 Prosedur Penelitian	29
3.8 Diagram Alir Penelitian	31
3.9 Rencana Penelitian.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Data Hasil Penelitian	37

4.2	Analisis Data Model Regresi Linear.....	38
4.2.1	Analisis Data Model Regresi Linear Variabel Bebas <i>Spindle Speed</i> terhadap Variabel Terikat Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet	39
4.2.2	Analisis Data Model Regresi Linear Variabel Bebas <i>Spindle Speed</i> terhadap Variabel Terikat Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet	40
4.3	Uji T.....	41
4.3.1	Uji T Variabel <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm	41
4.3.2	Uji T Variabel <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm	41
4.3.3	Uji T Variabel <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm	42
4.4	Grafik dan Pembahasan	43
4.4.1	Grafik dan Pembahasan Pengaruh <i>Spindle Speed</i> terhadap Kekasaran Permukaan pada Proses <i>Slot Milling</i> tanpa dan menggunakan Medan Magnet	43
4.4.2	Grafik dan Pembahasan <i>Displacement</i> pada Proses <i>Slot Milling</i> tanpa dan dengan Medan Magnet.....	44
4.4.2.1	Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm.....	45
4.4.2.2	Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm.....	48
4.4.2.3	Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm.....	51
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	55
5.2	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		xi
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Angka Kekasaran (ISO <i>Roughness Number</i>) dan Panjang Sampel Standar ..	12
Tabel 3.1	Variabel Bebas	23
Tabel 3.2	Rancangan Pengambilan Data Ra	34
Tabel 4.1	Hasil Penelitian Kekasaran Permukaan (Ra).....	37
Tabel 4.2	Data Korelasi Proses tanpa Pengaplikasian Medan Magnet	39
Tabel 4.3	Data Determinasi Proses tanpa Pengaplikasian Medan Magnet	39
Tabel 4.4	Data Korelasi Proses dengan Pengaplikasian Medan Magnet	40
Tabel 4.5	Data Determinasi Proses dengan Pengaplikasian Medan Magnet	40
Tabel 4.6	Data Uji T variabel <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) magnet	41
Tabel 4.7	Data Uji T variabel <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) magnet	41
Tabel 4.8	Data Uji T variabel <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) magnet	42
Tabel 4.9	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm.....	47
Tabel 4.10	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm.....	47
Tabel 4.11	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm.....	50
Tabel 4.12	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm.....	50
Tabel 4.13	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm.....	53
Tabel 4.14	Rentang Waktu Pengambilan Data <i>Displacement</i> dan Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm.....	53

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	a) <i>Technical Process</i> dan b) <i>Economic Process</i>	6
Gambar 2.2	Proses <i>Machining</i>	6
Gambar 2.3	Proses <i>Slot Milling</i>	7
Gambar 2.4	<i>Axial Depth of Cut</i> (a_e) dan <i>Radial Depth of Cut</i> (a_p).....	9
Gambar 2.5	Mesin <i>Micromill CNC Milling</i>	10
Gambar 2.6	Sistem Persumbuan Mesin <i>CNC Milling</i>	10
Gambar 2.7	Profil Kekasaran Permukaan	11
Gambar 2.8	<i>Regenerative Effect</i>	14
Gambar 2.9	<i>Chatter</i> pada Proses <i>Milling</i>	15
Gambar 2.10	Fase <i>Chip Load</i> untuk Resonansi (a) dan <i>Regenerative Chatter</i> (b).....	15
Gambar 2.11	Garis Gaya Magnet.....	17
Gambar 2.12	Arah Garis Gaya Magnet.....	18
Gambar 2.13	Dimensi Magnet Permanen Batang	19
Gambar 2.14	Ilustrasi Posisi Tolak Menolak pada dua buah Magnet Permanen Identik	19
Gambar 2.15	Sistem <i>Single Degree of Freedom</i> (SDOF) dengan Magnet Permanen (a) dan Skema Pemasangannya (b)	20
Gambar 2.16	Kerangka Penelitian.....	22
Gambar 3.1	Mesin Denford <i>Micromill CNC Milling</i>	24
Gambar 3.2	<i>Surface Roughness Tester</i> SJ-301	25
Gambar 3.3	<i>Square End Mill</i> Diameter 4 mm.....	26
Gambar 3.4	<i>Vibration Meter</i>	26
Gambar 3.5	<i>Height Gauge</i>	27
Gambar 3.6	<i>Neodymium Magnet</i>	27
Gambar 3.7	Benda Kerja Aluminium.....	28
Gambar 3.8	Dimensi Benda Kerja dalam mm	28
Gambar 3.9	Skema Penelitian	29
Gambar 3.10	Proses Pemakanan Tampak Depan (a) dan Tampak Isometris (b).....	32
Gambar 3.11	Pembagian Segmen Pengambilan Data	33
Gambar 3.12	Rencana Grafik Ra.....	34
Gambar 3.13	Rencana Grafik Amplitudo.....	35
Gambar 3.14	Rencana Grafik <i>Spectrum Frequency</i>	35
Gambar 4.1	Grafik Pengaruh Variasi Nilai <i>Spindle Speed</i> dan Pengaplikasian Medan Magnet terhadap Kekasaran Permukaan	43
Gambar 4.2	Data Amplitudo pada Proses <i>Slot Milling</i> dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet.....	45
Gambar 4.3	Data <i>Spectrum Frequency</i> pada Proses <i>Slot Milling</i> dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 18,6$ detik.....	45
Gambar 4.4	Data Kekasaran Permukaan Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm tanpa (a) dan dengan (b) Medan Magnet	45
Gambar 4.5	Data Amplitudo pada Proses <i>Slot Milling</i> dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet.....	48
Gambar 4.6	Data <i>Spectrum Frequency</i> pada Proses <i>Slot Milling</i> dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 7,8$ detik.....	48

Gambar 4.7 Data Kekasaran Permukaan Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa (a) dan dengan (b) Medan Magnet 48

Gambar 4.8 Data Amplitudo pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2800 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet 51

Gambar 4.9 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2800 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 18,6$ detik..... 51

Gambar 4.10 Data Kekasaran Permukaan Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa (a) dan dengan (b) Medan Magnet 51



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul
Lampiran 1.	Data Amplitudo, <i>Spectrum Frequency</i> , dan Kekasaran Permukaan tiap Segmen pada Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm
Lampiran 2.	Data Amplitudo, <i>Spectrum Frequency</i> , dan Kekasaran Permukaan tiap Segmen pada Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm
Lampiran 3.	Data Amplitudo, <i>Spectrum Frequency</i> , dan Kekasaran Permukaan tiap Segmen pada Proses Pemakanan dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm
Lampiran 4.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> tanpa Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm
Lampiran 5.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> dengan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2400 rpm
Lampiran 6.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> tanpa Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm
Lampiran 7.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> dengan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2600 rpm
Lampiran 8.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> tanpa Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm
Lampiran 9.	Data Amplitudo Proses <i>Slot Milling</i> dengan Magnet dengan <i>Spindle Speed</i> 2800 rpm
Lampiran 10.	Data <i>Spectrum Frequency</i> Segmen 1 untuk Proses dengan <i>Spindle Speed</i> 2400, 2600, dan 2800 rpm
Lampiran 11.	Data <i>Spectrum Frequency</i> Segmen 2 untuk Proses dengan <i>Spindle Speed</i> 2400, 2600, dan 2800 rpm
Lampiran 12.	Data <i>Spectrum Frequency</i> Segmen 3 untuk Proses dengan <i>Spindle Speed</i> 2400, 2600, dan 2800 rpm
Lampiran 13.	Data <i>Spectrum Frequency</i> Segmen 4 untuk Proses dengan <i>Spindle Speed</i> 2400, 2600, dan 2800 rpm
Lampiran 14.	Data <i>Spectrum Frequency</i> Segmen 5 untuk Proses dengan <i>Spindle Speed</i> 2400, 2600, dan 2800 rpm
Lampiran 15.	Gambar Benda Kerja Hasil Proses
Lampiran 16.	Hasil Uji Komposisi Material
Lampiran 17.	Hasil Uji Kekuatan Magnet

RINGKASAN

Ghani Ilham Ariestono, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Spindle Speed dan Pengaplikasian Magnet pada Proses Slot Milling menggunakan Mesin Micromill terhadap Kekasaran Permukaan Aluminium*, Dosen Pembimbing: Achmad As'ad Sonief dan Fikrul Akbar Alamsyah

Permintaan kebutuhan akan komponen berskala mikro meningkat selama beberapa dekade, baik untuk peningkatan performa produk dan juga meningkatkan pertumbuhan ekonomi industri. Perlu adanya proses permesinan yang dapat membentuk produk berskala mikro dengan tingkat ketelitian tinggi dan variasi bentuk yang kompleks. *Micro milling* jenis *slot milling* menjadi solusi dalam memenuhi permintaan tersebut. Meskipun demikian, dalam prosesnya memiliki permasalahan yang masih sering terjadi, yaitu *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* menyebabkan permukaan benda kerja menjadi kasar dan bergelombang yang berujung pada menurunnya kualitas sebuah produk.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi nilai *spindle speed* dan pengaplikasian medan magnet terhadap kekasaran permukaan pada proses *slot milling* untuk mereduksi fenomena *chatter*. Variasi *spindle speed* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2400, 2600, dan 2800 rpm yang masing-masing nilainya dilakukan proses pemakanan jenis *slot milling* dengan dan tanpa menggunakan magnet permanen jenis *neodymium* berkekuatan 12000 Gauss menggunakan pahat *square end mill* HSS Co-8 berdiameter 4 mm di atas permukaan benda kerja aluminium.

Hasil yang didapat yaitu nilai kekasaran dengan persamaan Kekasaran Permukaan (Ra) untuk proses tanpa magnet adalah $Ra = N^{-2,881} \cdot 35419557234$ dan persamaan Kekasaran Permukaan (Ra) proses dengan magnet adalah $Ra = N^{-1,961} \cdot 1885173,378$. Nilai Ra yang didapat pada proses *slot milling* dengan *spindle speed* 2400, 2600, dan 2800 rpm secara berturut-turut adalah 0,819 μm ; 0,432 μm ; 0,384 μm (tanpa magnet) dan 0,432 μm ; 0,341 μm ; 0,304 μm (dengan magnet).

Kata Kunci: *micro milling, regenerative chatter, spindle speed, magnet permanen, kekasaran permukaan*

SUMMARY

Ghani Ilham Ariestono, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, June 2018 *Influence of Spindle Speed and the Application of Magnetic Field in Slot Milling Process using Micromill Machine to Surface Roughness of Aluminium*. Academic Supervisor: Achmad As'ad Sonief and Fikrul Akbar Alamsyah

Demands for the need of micro components have increased over the decades, both for product's performance enhancement and also for increasing economic growth. There is a need for machining processes that can form a micro-scale product with high level of accuracy and complex form variations. Slot milling as one of micro milling's processes could be the solution to meet the demands. Nevertheless, this process has a problem that is still common, called regenerative chatter. The phenomenon causes the workpiece surface to be rough and wavy which leads to decreased quality of a product.

This study aims to determine the effect of spindle speed variation and application of magnetic field on surface roughness in slot-milling process to reduce chatter. Spindle speed variation that used in this research is 2400, 2600, and 2800 rpm which each value is machined with and without application of magnetic field with 12000 Gauss of neodymium-type magnetic strength using 4 mm diameter HSS Co-8 square end mill cutting tool above the surface of the workpiece of aluminium.

The surface roughness (Ra) equations are $Ra = N^{-2,881} \cdot 35419557234$ for process without magnet and $Ra = N^{-1,961} \cdot 1885173,378$ for process with magnet. The surface roughness values obtained with the value of spindle speed 2400, 2600, 2800 rpm are 0,819 μm ; 0,432 μm ; 0,384 μm (without magnet) and 0,432 μm ; 0,341 μm ; 0,304 μm (with magnet) respectively.

Keywords: *micro milling, regenerative chatter, spindle speed, permanent magnet, surface roughness*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Selama beberapa dekade terakhir, permintaan akan komponen ataupun miniatur dengan tingkat akurasi tinggi berkembang sangat pesat pada beberapa segmen pasar seperti kedirgantaraan, medis, otomotif, elektronik, telekomunikasi, hingga optik. *Yole Development* menganalisis bahwa secara keseluruhan, pasar dari *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS) berkembang dari 8 miliar US dollar menjadi 18 miliar US dollar di tahun 2015 (Cheng, 2013, p. 185). Dan berdasarkan *Allied Market Research*, pasar segmen ini diprediksikan meningkat hingga 26,8 miliar US Dollar pada tahun 2022 (Singh, 2017). Hal tersebut mengindikasikan bahwa *part* mikro menjadi semakin penting, baik untuk peningkatan performa produk dan juga untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi industri.

Untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut, diperlukan sebuah upaya yang cepat, tepat, dapat diandalkan, serta secara berulang dalam memproses benda tiga dimensi yang terbuat dari berbagai macam material untuk menghasilkan bentuk yang kompleks. Penerapan yang paling potensial dan memiliki banyak keuntungan dalam prosesnya adalah *micro-milling*.

Micro-milling adalah proses permesinan yang dapat membentuk produk berskala mikro melalui proses pengurangan material benda kerja menggunakan pahat potong bersisi banyak (*multiple cutting edge*). Terdapat beberapa jenis *micro-milling*, di antaranya adalah *slot milling* yaitu proses pengurangan material dengan membentuk celah pada permukaan benda kerja. Dalam prosesnya, beban geram pada benda kerja turut terbentuk sebagai hasil dari pengurangan material benda kerja.

Dikarenakan ukuran diameter pahat potong yang sangat kecil, kekakuan pahat menjadi rendah sehingga tidak dapat menahan beban geram yang tinggi. Dengan kecepatan putaran yang tinggi, beban geram tersebut dapat berkurang. Namun, kecepatan putaran yang tinggi justru menyebabkan permasalahan baru terhadap stabilitas dinamis dari pahat. Bagian sisi radius pahat yang digunakan dalam proses permesinan mengalami kontak dengan geram yang belum terpotong pada benda kerja sehingga menghasilkan variasi gaya dinamis yang dapat menimbulkan *chatter*.

Chatter menyebabkan permukaan benda kerja menjadi kasar dan bergelombang sehingga peredaman menjadi satu hal yang perlu untuk dilakukan. Terdapat banyak metode

peredaman *chatter* dan salah satu metodenya adalah dengan menggunakan metode *magnetic damping* atau peredaman menggunakan medan magnet. Medan magnet berfungsi untuk menurunkan amplitudo *chatter*, sehingga dapat mereduksi nilai kekasaran permukaan produk.

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan sebuah ketidakteraturan konfigurasi permukaan yang dapat berupa goresan atau lekukan-lekukan kecil pada suatu benda. Kekasaran permukaan merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kualitas sebuah produk, dikarenakan kekasaran permukaan memiliki pengaruh besar terhadap sifat mekanik suatu bahan contohnya ketahanan terhadap *fatigue*, ketahanan terhadap karat, ketahanan terhadap gesekan, dan lain-lain. (Rochim, 2001).

Tingkat kekasaran permukaan sebuah produk tidak lepas dari beberapa faktor yaitu pahat, parameter pemotongan, benda kerja, dan *machine tool*. Dalam pemilihan parameter pemotongan, salah satunya yang cukup mempengaruhi yaitu *spindle speed* dimana *spindle speed* dapat menurunkan tingkat kekasaran permukaan sehingga meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan. Penentuan nilai *spindle speed* juga berpengaruh dalam getaran yang ada pada pahat atau *chatter*. Kekeliruan penentuan parameter pemotongan menyebabkan nilai *chatter* semakin tinggi.

Berdasarkan pemaparan di atas, dapat diketahui bahwa tingkat kualitas suatu produk ditentukan dari proses permesinan yang dilakukan, pemilihan parameter pemotongan, dan pemilihan material. Upaya demi meningkatkan kualitas produk yang diinginkan adalah dengan mengurangi *chatter* menggunakan metode *magnetic damping* dan menentukan *spindle speed* yang sesuai. Penelitian ini menjadikan tingkat kekasaran permukaan menjadi acuan dalam menentukan kualitas sebuah produk. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh *spindle speed* terhadap kekasaran permukaan aluminium pada proses *slot milling* menggunakan metode *magnetic damping* untuk mereduksi *chatter*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang ada, rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *spindle speed* dan medan magnet terhadap kekasaran permukaan aluminium pada proses *slot milling* untuk mereduksi *chatter*.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjadikan penelitian ini semakin terarah dan menghindari semakin meluasnya masalah, maka batasan masalah dari penelitian ini adalah:

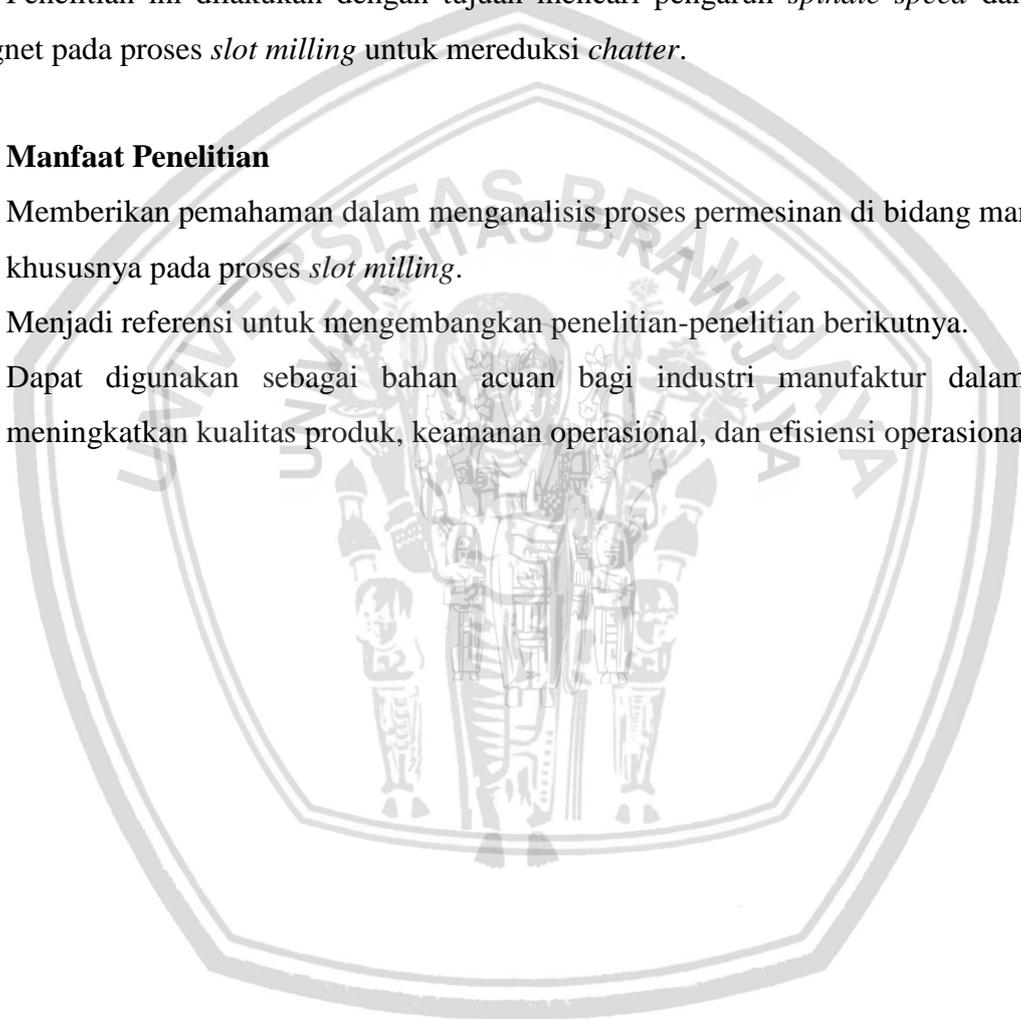
1. Mesin yang digunakan dalam keadaan baik.
2. Pahat yang digunakan dalam keadaan yang sama untuk setiap proses permesinan.
3. Perubahan nilai temperatur yang terjadi pada saat proses permesinan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mencari pengaruh *spindle speed* dan medan magnet pada proses *slot milling* untuk mereduksi *chatter*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan pemahaman dalam menganalisis proses permesinan di bidang manufaktur khususnya pada proses *slot milling*.
2. Menjadi referensi untuk mengembangkan penelitian-penelitian berikutnya.
3. Dapat digunakan sebagai bahan acuan bagi industri manufaktur dalam upaya meningkatkan kualitas produk, keamanan operasional, dan efisiensi operasional.





BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Terdahulu

Huo et al. (2015) melakukan penelitian tentang analisis karakter permukaan *monocrystalline silicon* yang dilakukan proses *micro-milling* menggunakan pahat *micro-end mill* berbahan tungsten karbida berdiameter 0,5 mm. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin tinggi *spindle speed* dan semakin rendah *feedrate* yang dihasilkan akan memberikan kekasaran permukaan yang rendah.

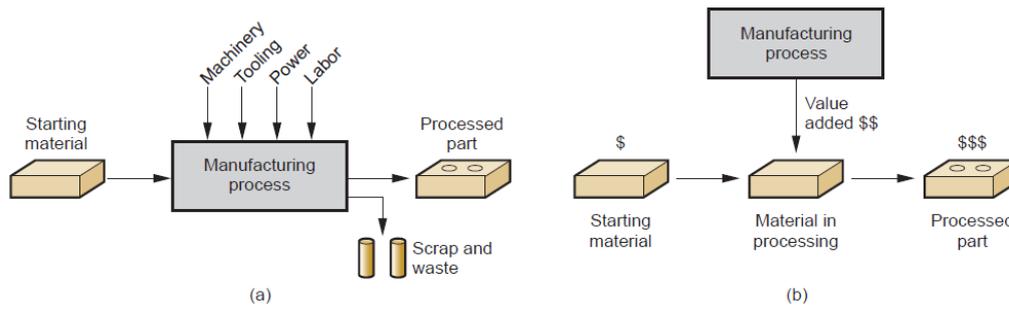
Kalinski et al. (2015) melakukan penelitian tentang reduksi getaran yang terjadi pada proses *ball-end milling* dengan menentukan *spindle speed* optimalnya. *Spindle speed* berpengaruh terhadap terciptanya getaran pada pahat dalam konteks ini *ball-end mill*. Dari penelitian ini didapat kesimpulan bahwa amplitudo getaran pada pahat potong menurun ketika diperoleh nilai *spindle speed* semakin optimal, sehingga meningkat pula kualitas produk yang dihasilkan.

Paul et al. (2013) melakukan penelitian tentang efek dari pengaplikasian magnet sebagai peredam dalam proses *hard turning*. Dari penelitian ini dihasilkan kesimpulan bahwa magnet sebagai peredam mampu memperkecil getaran pada pahat potong, meningkatkan *surface finish*, mereduksi *cutting force* dan *tool wear* secara signifikan.

Ali et al. (2012) melakukan penelitian tentang getaran permesinan (*chatter*) dan kekasaran permukaan benda kerja PMMA (*poly methyl methacrylate*) pada proses *micro milling*. Dari penelitian tersebut didapat kesimpulan bahwa parameter permesinan yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* dapat mempengaruhi nilai *chatter* yang terjadi pada mesin *micro milling*. Besarnya nilai *chatter* diperanguhi oleh *feed rate* dan *depth of cut*. Sedangkan yang paling mempengaruhi dalam menentukan nilai kekasaran adalah *spindle speed*.

2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur bisa didefinisikan dalam dua cara, yaitu secara teknologi dan secara ekonomi. Proses manufaktur secara teknologi yaitu penerapan dari proses fisik maupun kimiawi yang bertujuan mengubah geometri, sifat, dan/atau tampilan dari suatu bahan awal untuk menghasilkan produk atau *part* tertentu. Proses manufaktur juga termasuk proses *assembly* dari sejumlah *part* untuk membuat produk.



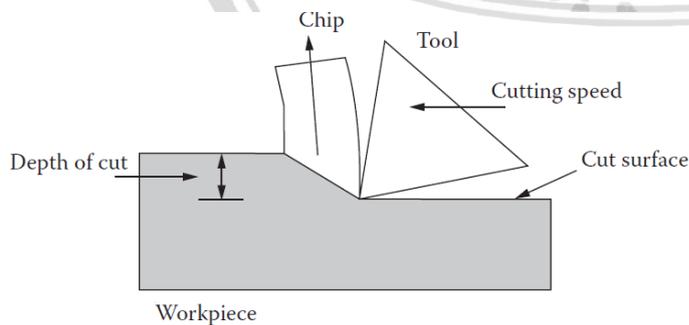
Gambar 2.1 a) *Technical Process* dan b) *Economic Process*

Sumber: Groover (2010, p.4)

Secara ekonomi, proses manufaktur adalah transformasi suatu material menjadi sebuah benda yang memiliki nilai guna yang lebih tinggi dengan satu atau lebih proses juga *assembly*. Pada intinya, proses manufaktur bertujuan untuk meningkatkan nilai guna suatu material dengan cara mengubah ukurannya, *properties*-nya, ataupun menggabungkannya dengan material lain yang sudah diubah. Sebagai contoh, ketika minyak bumi diubah menjadi plastik atau bijih besi diubah menjadi baja, nilai guna benda tersebut bertambah. (Groover, 2010, p.4)

2.3 Proses *Machining*

Proses *machining* merupakan proses manufaktur dengan menggunakan pahat potong (*cutting tool*) untuk menghilangkan sebagian material untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan (Groover, 2010, p.483). Secara umum, proses *machining* dilakukan untuk *finishing* pada *parts* yang dihasilkan dari proses *casting* dan *forming* sebelum siap untuk disatukan (*assembly*) ataupun digunakan. (El-Hofy, 2014, p.1)



Gambar 2.2 Proses *Machining*

Sumber : El Hofy (2014, p.5)

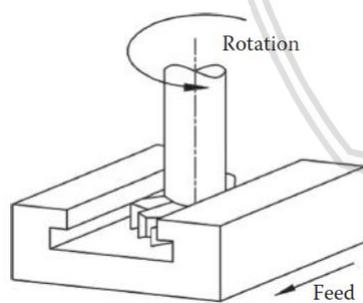
2.4 Mesin *Milling*

Proses *milling* termasuk proses manufaktur non-abrasif yang melakukan pemotongan menggunakan pahat dengan geometri tertentu (Rattat, 2017). Mekanismenya yaitu pahat potong *multi-edge* memotong berputar pada sumbu mesin dan melakukan proses permesinan terhadap benda kerja (*workpiece*). Oleh karena itu, mesin *milling* merupakan mesin perkakas yang berkapabilitas dalam melakukan proses *milling*. Secara umum penggunaan dari mesin *milling* yaitu dengan menempatkan benda kerja pada pencekam dan alat potong dipasangkan pada sumbu utama yang digerakkan oleh *spindle*. Mesin *milling* memiliki karakteristik yang serupa dengan mesin bor, tetapi dengan fleksibilitas yang lebih tinggi karena dapat melakukan pemakanan pada benda kerja ke segala arah (Groover, 2010, p.523).

Berdasarkan orientasi *spindle* yang memutar sumbu utamanya, mesin *milling* dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

1. Mesin *milling universal*
2. Mesin *milling* vertikal
3. Mesin *milling* horizontal

Pada penelitian ini, proses yang dilakukan pada mesin *milling* adalah *slot-milling*. *Slot-milling* merupakan salah satu jenis dari proses *milling* yang bertujuan untuk membentuk celah pada benda kerja.



Gambar 2.3 Proses *Slot Milling*
Sumber : El-Hofy (2014, p.7)

2.4.1 Parameter Pemotongan pada Proses *Slot-Milling*

Parameter pemotongan merupakan kondisi-kondisi yang ditentukan dalam melakukan proses permesinan. Terdapat beberapa macam parameter pemotongan pada proses *slot-milling*, antara lain:

1. Kecepatan pemotongan dan *Spindle speed*

Kecepatan pemotongan (V_c) merupakan kecepatan tangensial dari sisi luar pahat potong. Kecepatan pemotongan secara langsung berkaitan dengan diameter pahat potong dan kecepatan putaran *spindle*, seperti pada persamaan berikut:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan:

V_c = Kecepatan pemotongan (m/min)

D = Diameter pahat potong (mm)

N = *Spindle speed* (rpm)

Sumber: Davim (2011, p.222)

Besarnya nilai diameter pahat potong dalam satu kali jalannya pemakanan pada proses *milling* selalu tetap sehingga dalam parameter ini kecepatan putaran *spindle* yang mempengaruhi kualitas suatu produk.

2. *Feed per tooth*

Feed per tooth (f_z) merupakan jarak yang ditempuh pahat dalam menyayat benda kerja per jumlah sudu pahat (*cutting edge*). Parameter ini juga dapat diartikan sebagai ketebalan *chip* yang dihasilkan untuk satu sudu pahat, sesuai dengan persamaan berikut:

$$f_z = \frac{V_f}{z \cdot N} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan:

f_z = *Feed per tooth* (mm/tooth)

V_f = *Feed rate* (mm/min)

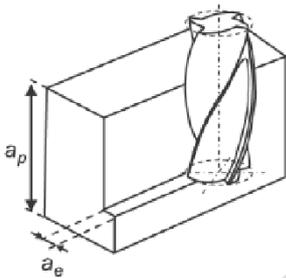
z = Jumlah sudu pahat (tooth)

N = Kecepatan putaran *spindle* (rpm)

Sumber: Davim (2011, p.223)

3. *Depth of Cut*

Depth of Cut adalah dalamnya pemotongan benda kerja yang dilakukan oleh pahat potong. Terdapat dua macam *depth of cut* pada proses *milling* antara lain *axial depth of cut* (a_p) dan *radial depth of cut* (a_e). Keduanya berpengaruh terhadap beban yang diterima oleh pahat potong. Beban yang diterima pahat akan semakin meningkat ketika nilai *depth of cut* semakin besar. Persamaan dari *depth of cut* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4 Axial Depth of Cut (a_e) dan Radial Depth of Cut (a_p)

Sumber: Davim (2011,p.225)

4. *Material removal rate*

Material removal rate dalam proses *milling* dapat ditentukan melalui *cross-sectional area* dari bagian yang terpotong dan *feed rate*:

$$R_{MR} = w \cdot d \cdot V_f \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan:

R_{MR} = *Material removal rate* (mm^3/min)

w = Lebar pahat potong (mm)

d = Dalamnya pemakanan/*depth of cut* (mm)

V_f = *Feed rate* (mm/min)

Sumber: Groover (2010, p. 527)

2.4.2 *Micromill CNC Milling*

Micro-milling (jika menggunakan pahat *end mill* menjadi *micro-end milling*) merupakan suatu proses yang memungkinkan dalam memproduksi *micro parts* termasuk cetakan/*dies* mikro dan perangkat berbahan logam yang berfungsi sepenuhnya (Ali et. al, 2012).

Micromill CNC Milling merupakan mesin perkakas berjenis *milling* yang dikontrol menggunakan bahasa numerik, yaitu data perintah dengan kode angka, huruf, dan simbol. Mesin *milling* CNC memiliki keunggulan daripada mesin perkakas konvensional di segi fleksibilitasnya dan produktivitasnya sehingga jenis mesin CNC cocok untuk produksi massal. Mesin CNC juga memiliki keunggulan dalam hal melakukan pengerjaan dengan tingkat kerumitan yang tinggi dan mengurangi campur tangan operator selama mesin beroperasi.

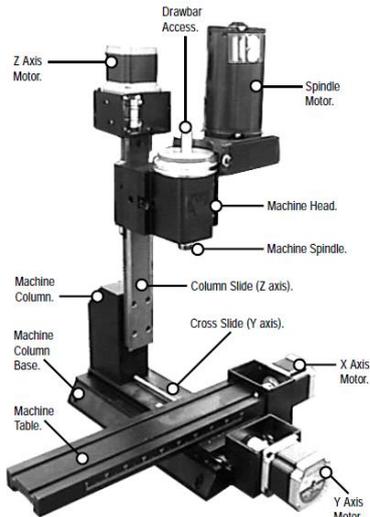


Gambar 2.5 Mesin *Micromill CNC Milling*
Sumber: *Micromill Operator Manual*

Prinsip dasar dari mesin ini yaitu meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan pahat berputar dan bergerak secara vertikal. Arah persumbuan mesin ini mengacu pada koordinat kartesius dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kiri dan ke kanan.
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau ke depan dan ke belakang.
3. Sumbu Z untuk arah gerak vertikal atau ke atas dan ke bawah.

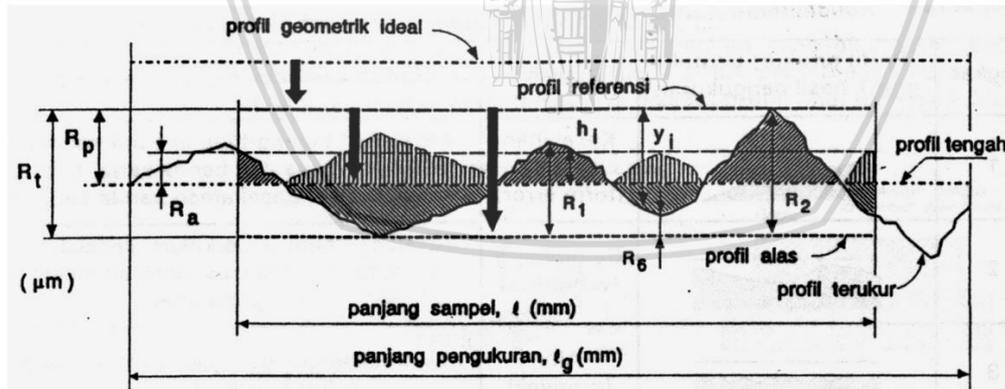
Untuk sistem persumbuan secara detail dapat dilihat pada gambar 2-9.



Gambar 2.6 Sistem Persumbuan Mesin CNC Milling
 Sumber : Micromill Operator Manual

2.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan atau *surface roughness* merupakan ketidakteraturan suatu konfigurasi permukaan yang dapat berupa lekukan-lekukan ataupun goresan kecil pada benda. Kekasaran permukaan digunakan sebagai tolak ukur kualitas dari suatu produk. Material dengan nilai kekasaran permukaan yang tinggi cenderung bersifat korosif. Beberapa istilah profil permukaan dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.7 Profil Kekasaran Permukaan
 Sumber : Rochim (2001, p.56)

Beberapa bagian dari profil dan parameter kekasaran permukaan, yaitu:

1. Profil Geometri Ideal

Merupakan profil permukaan sempurna berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung.

2. Profil Terukur

Merupakan profil yang dapat diukur menggunakan alat ukur.

3. Profil Referensi

Merupakan profil yang berfungsi sebagai referensi atau acuan dalam menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini berbentuk garis lurus atau sesuai dengan bentuk profil geometri ideal dan menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel. Profil ini juga biasa disebut dengan profil puncak (*cust-line*).

4. Profil Alas

Merupakan profil yang digeser ke bawah secara tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel sampai menyentuh titik terendah dari suatu profil terukur.

5. Profil Tengah

Merupakan profil yang posisinya berada di tengah-tengah berfungsi untuk mengetahui luas daerah di bawah profil tengah sampai profil terukur yang ditunjukkan oleh daerah terarsir.

6. Kekasaran Rata-rata Aritmetis (Ra)

Merupakan harga rata-rata aritmetis dari harga absolut antara profil terukur dengan profil tengah, disebut juga *mean roughness index*. Nilai kekasaran rata-ratanya ditinjau dari luasan puncak dan luasan lembah pada suatu panjang pengukuran tertentu.

Tabel 2.1
Angka kekasaran (ISO *Roughness Number*) dan Panjang Sampel Standar

Harga kekasaran Ra (μm)	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12.5	N10	2.5
6.3	N9	
3.2	N8	
1.6	N7	0.8
0.8	N6	
0.4	N5	
0.2	N4	
0.1	N3	0.25
0.05	N2	
0.025	N1	

Sumber: Rochim (2001, p.62)

Hubungan dari nilai kekasaran permukaan dengan parameter *spindle speed* bisa didapat dari persamaan hubungan antara pemakanan dengan kekasaran permukaan terdapat pada persamaan berikut

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} \dots\dots\dots (2-4)$$

dengan:

Ra = Kekasaran permukaan rata-rata (μm)

f = *Feed* (mm/rev)

NR = *Nose radius* (mm)

Sumber: (Groover, 2010, p.590)

Dimana nilai *feed* didapat melalui persamaan berikut

$$f = \frac{V_f}{N} \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan:

V_f = *Feed rate* (mm/min)

N = *Spindle speed* (rpm)

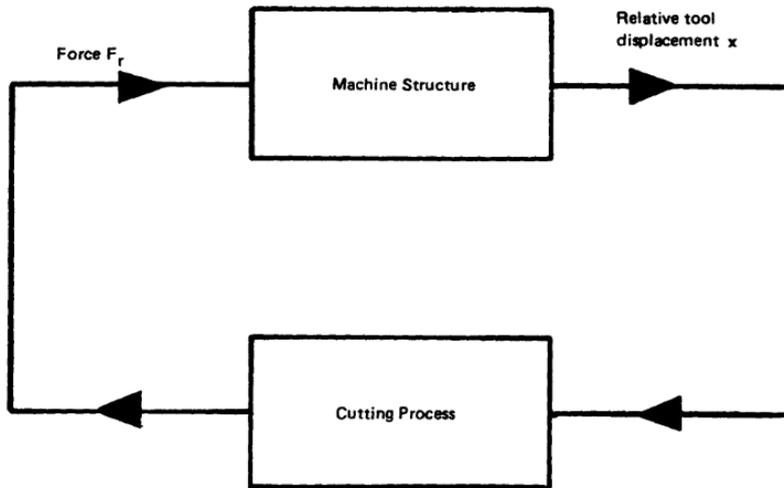
Sumber: Groover (2010, p.590)

Sehingga nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*. Hasil kekasaran permukaan yang diperoleh selama proses permesinan adalah gabungan dari kedua efek (Boothroyd, 1989, p.166), antara lain:

1. Kekasaran permukaan ideal, yang dihasilkan dari geometri pahat potong dan asutan (*feed*) atau kecepatan asutan (*feed speed*).
2. Kekasaran permukaan natural, hasil dari ketidakteraturan jalannya pahat selama proses pemotongan.

2.6 Getaran pada Proses Permesinan

Getaran dalam proses *milling*, terjadi karena adanya perpindahan (*displacement*) pada pahat potong dari titik keseimbangannya yang diakibatkan oleh terbentuknya gaya yang mengeksitasi sistem tersebut dan kembali lagi ke titik keseimbangannya dikarenakan adanya *regenerative effect*. *Regenerative effect* merupakan siklus yang terbentuk ketika *machine tool* mengalami *displacement* lalu pada *cutting process* dihasilkan nilai *cutting force* dan kembali lagi menghasilkan *tool displacement*, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.8.



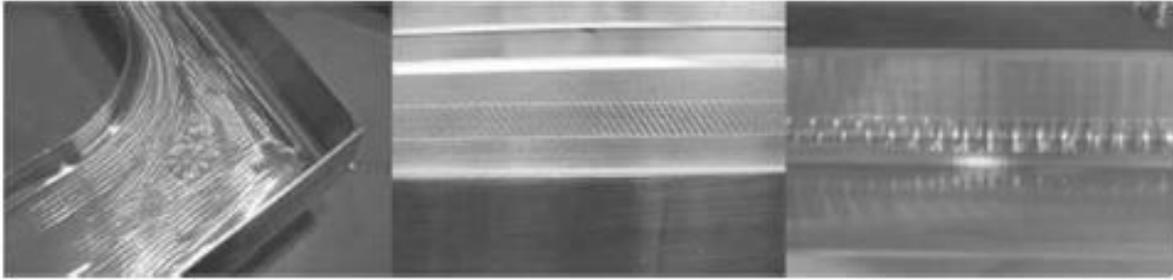
Gambar 2.8 Regenerative Effect
 Sumber: Boothroyd (1989, p.252)

Besarnya getaran yang terjadi pada proses permesinan memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas dari suatu produk. Getaran yang tidak terkontrol akan mengakibatkan beberapa hal berikut:

- Permukaan benda kerja yang kasar.
- Dimensi benda kerja yang tidak sesuai.
- Keausan prematur, *chipping*, dan kegagalan pada pahat potong.
- Kemungkinan adanya kerusakan pada komponen mesin
- Suara bising jika parameter yang digunakan dalam frekuensi tinggi.

(Kalpakjian & Schmid, 2009, p.706).

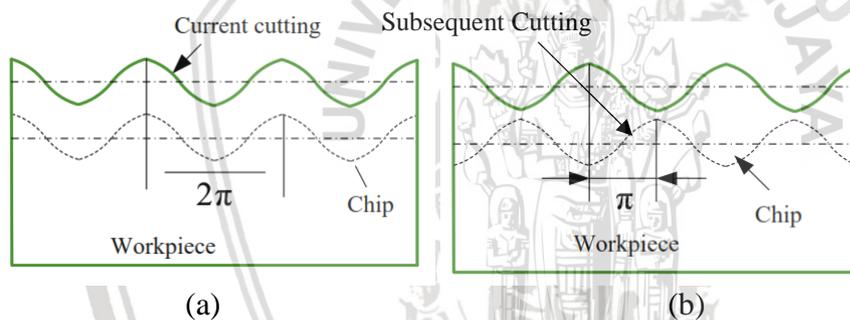
Selama operasi permesinan, *machine tools* mengalami kedua jenis getaran yaitu *forced vibrations* dan *self excited vibrations* (Altintas, 2012, p.125). *Self-excited vibrations* bisa disebut juga dengan istilah *chatter*, getaran ini disebabkan oleh adanya interaksi dari proses penghilangan geram dengan struktur dari pahat potong yang menciptakan fluktuasi pada *cutting force*. *Chatter* biasanya dimulai dengan adanya gangguan pada area pemotongan seperti inhomogenitas kondisi permukaan benda kerja.



Gambar 2.9 Chatter pada Proses Milling
Sumber : Davim (2011, p. 283)

Getaran pada proses permesinan dapat digolongkan sebagai resonansi jika hasil bagi antara frekuensi natural dengan *excitation frequency* memiliki nilai yang bulat (integer), sedangkan getaran dapat digolongkan sebagai *regenerative chatter* jika hasil baginya berupa nilai yang tidak bulat. (Song, 2014, p.175)

Hal tersebut juga dapat dilihat melalui fase *chip load* pada gambar 2.10 di bawah ini



Gambar 2.10 Fase *Chip Load* untuk Resonansi (a) dan *Regenerative Chatter* (b)
Sumber : Song (2014, p.175)

2.6.1 *Regenerative Chatter*

Regenerative chatter adalah salah satu jenis dari *self-excited vibration*, dimana tipe ini terjadi saat *cutting edge* memotong permukaan benda kerja yang sudah terpotong oleh *tooth* sebelumnya (Davim, 2011, p.284). Jika *tooth* sebelumnya mengalami getaran, maka *tooth* selanjutnya yang memotong permukaan yang sama akan menghasilkan *chip thickness* dan gaya pemotongan yang berbeda. Oleh karena itu, faktor-faktor yang mempengaruhi *chatter* antara lain:

- Gaya pemotongan, *chatter* akan semakin rentan terjadi ketika gaya pemotongan semakin besar dimana gaya pemotongan dipengaruhi parameter-parameter permesinan seperti *spindle speed*. *Spindle speed* yang terlalu rendah akan menghasilkan gaya pemotongan yang besar. Hubungan ini dapat diketahui melalui persamaan berikut

$$F_t = k_{tc} \cdot a \cdot h + k_{te} \cdot a \dots\dots\dots (2-6)$$

$$F_n = k_{nc} \cdot a \cdot h + k_{ne} \cdot a$$

dengan:

$F_t =$ *Tangential cutting force* (N)

$F_n =$ *Normal cutting force* (N)

$k_{tc}, k_{te}, k_{nc}, k_{ne} =$ Koefisien *cutting force*

$a =$ *chip width/axial depth of cut* (mm)

$h =$ *chip thickness*

Sumber: Bolsunovsky (2013, p.235)

Nilai *chip thickness* bisa ditentukan dengan persamaan

$$h = f_z \cdot \sin(\theta) \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan:

$f_z =$ *Feed per tooth* (mm/tooth)

$\theta =$ Sudut rotasi pahat

Sumber: Davim (2011, p. 225)

Kemudian nilai f_z dapat diketahui melalui persamaan 2-2 yang menjelaskan hubungan *spindle speed* dengan *feed per tooth* berbanding terbalik sehingga memenuhi pernyataan di atas.

- b. Jenis dan tebal *chip* yang dihasilkan, *continuous chip* menghasilkan *chatter* yang lebih kecil dibandingkan *discontinuous chip*.

Sesuai dengan namanya, *regenerative chatter* berlangsung secara terus menerus. *Self-excited vibrations* dapat dikontrol dengan menaikkan kekakuan dinamis dari sistem ataupun melakukan peredaman. (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.707).

2.6.2 Peredaman (*Damping*)

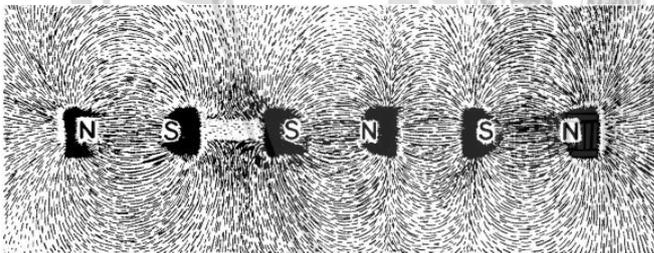
Peredaman (*damping*) merupakan fenomena penurunan amplitudo getaran sebagai hasil dari energi yang terdisipasi dari suatu sistem untuk mengatasi gaya gesekan ataupun gaya resistif lainnya, dalam konteks ini *chatter*. Terdapat beberapa jenis peredaman, antara lain:

- 1. *Viscous damping*, yaitu peredaman dengan memanfaatkan viskositas suatu fluida yang berfungsi untuk menahan getaran. Contoh dari peredaman ini adalah oli atau minyak.

2. *Couloumb damping*, disebut juga sebagai peredaman gesekan kering. Peredaman jenis ini dihasilkan dari gesekan yang terjadi antara dua permukaan kering atau kurangnya pelumasan.
3. *Solid* atau *hysteretic damping*, yaitu peredaman yang dimiliki oleh material itu sendiri yang sedang mengalami getaran.
4. *Magnetic damping*, yaitu peredaman yang memanfaatkan medan magnet dalam meredam getaran. Prinsip dari peredaman ini menggunakan prinsip *eddy current* yang dapat menghasilkan gaya yang bersifat menahan getaran yang terjadi pada sebuah konduktor.

2.7 Magnet

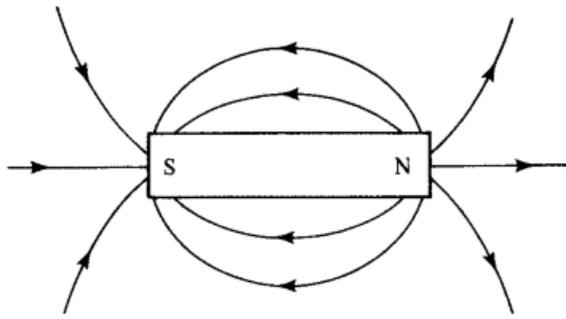
Magnet adalah suatu material atau objek yang dapat menghasilkan medan magnet. Medan magnet merupakan area dimana gaya magnet masih akan berpengaruh terhadap benda di sekitarnya. Pola ataupun bentuk medan magnet biasanya digambarkan dengan garis gaya magnet. Secara kasat mata, garis ini tidak terlihat kecuali dengan mendekatkan bijih besi kepada magnet.



Gambar 2.11 Garis Gaya Magnet
Sumber : Cullity (2009, p.5)

Semakin rapat bijih besi yang menempel pada magnet, maka semakin kuat medan magnet yang berada pada area tersebut. Medan magnet terbesar terletak pada bagian kutub-kutub dari magnet dimana kutub magnet terdiri atas kutub utara (*north pole*) dan kutub selatan (*south pole*). Magnet memiliki prinsip jika kedua kutub yang sama masing-masing didekatkan, maka magnet akan tolak menolak dan sebaliknya jika kedua kutub yang berbeda didekatkan, maka magnet akan menarik satu sama lain.

Sifat lainnya dari magnet yaitu arah garis gaya magnet selalu dimulai dari kutub utara menuju ke kutub selatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.12 Arah Garis Gaya Magnet
 Sumber : Cullity (2009, p.4)

Jika kedua objek menarik satu sama lain dan juga saling tolak, maka benda-benda tersebut dapat dikatakan sebagai magnet. Namun, jika terdapat benda yang tertarik tetapi tidak menolak terhadap magnet, benda tersebut tergolong sebagai *magnetic material* (Coey, 2009).

2.7.1 Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan salah satu jenis dari magnet yang dapat mempertahankan kekuatan magnetnya dalam jangka waktu lama. Magnet jenis ini terbuat dari feromagnetik keras yang dapat termagnetisasi jika ditempatkan di dalam medan magnet.

2.7.2 Magnet Permanen sebagai Peredam Getaran

Dua buah magnet jika didekatkan pada dua kutub yang sama akan menghasilkan gaya tolak atau *repulsive force*. Yang pertama dilakukan adalah mencari nilai induksi magnet (B_0) melalui persamaan berikut

$$B_0 = \frac{B_r}{\pi} \left(0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

dengan:

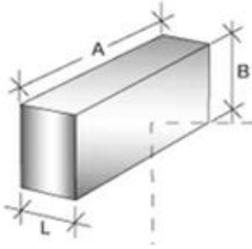
B_0 = Induksi magnet pada permukaan magnet permanen (T)

B_r = *Residual induction* (T)

A = Panjang magnet permanen batang (m)

B = Lebar magnet permanen batang (m)

L = Tebal magnet permanen batang (m)



Gambar 2.13 Dimensi Magnet Permanen Batang

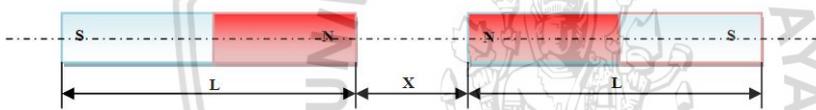
Sehingga, persamaan gaya tolak yang dihasilkan oleh dua buah gaya magnet adalah

$$F = \frac{B_0^2 (AB)^2}{4\pi\mu_0 \left(0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}}\right)^2} \left(-\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+2L)^2} + \frac{2}{(x+L)^2}\right) \dots\dots\dots (2-9)$$

dengan:

x = Jarak antara 2 magnet permanen

μ_0 = Permeabilitas ruang hampa = $4\pi \times 10^{-7}$



Gambar 2.14 Ilustrasi Posisi Tolak Menolak pada 2 buah Magnet Permanen Identik

Besarnya jarak antara 2 magnet permanen (x) dapat ditentukan terlebih dahulu dengan peletakan yang sedekat mungkin dengan pahat tetapi tidak menempel (Sulaiman, 2012). Pada penelitian ini, nilai x yang digunakan sebesar 25 mm berdasarkan pertimbangan keamanan antara magnet dengan pahat pada saat proses permesinan. Menggunakan persamaan 2-9 besarnya gaya tolak antara 2 magnet permanen yang didapat adalah 6,7 N dengan kedua magnet memiliki kekuatan masing-masing sebesar 12000 Gauss.

Besarnya gaya tolak yang dimiliki magnet permanen memiliki hubungan terhadap peredaman getaran dibuktikan dengan berkurangnya nilai amplitudo getaran, melalui permodelan *single degree of freedom* (SDOF) system dengan peredaman dapat diketahui persamaan berikut

$$m\ddot{x} + (c_1 + c_2)\dot{x} + (k_1 + k_2)x = F_0 \dots\dots\dots (2-10)$$

Dan persamaan untuk amplitudo getaran yaitu

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (2-11)$$

keterangan:

m = Massa (kg)

c = Konstanta peredaman

k = Konstanta pegas

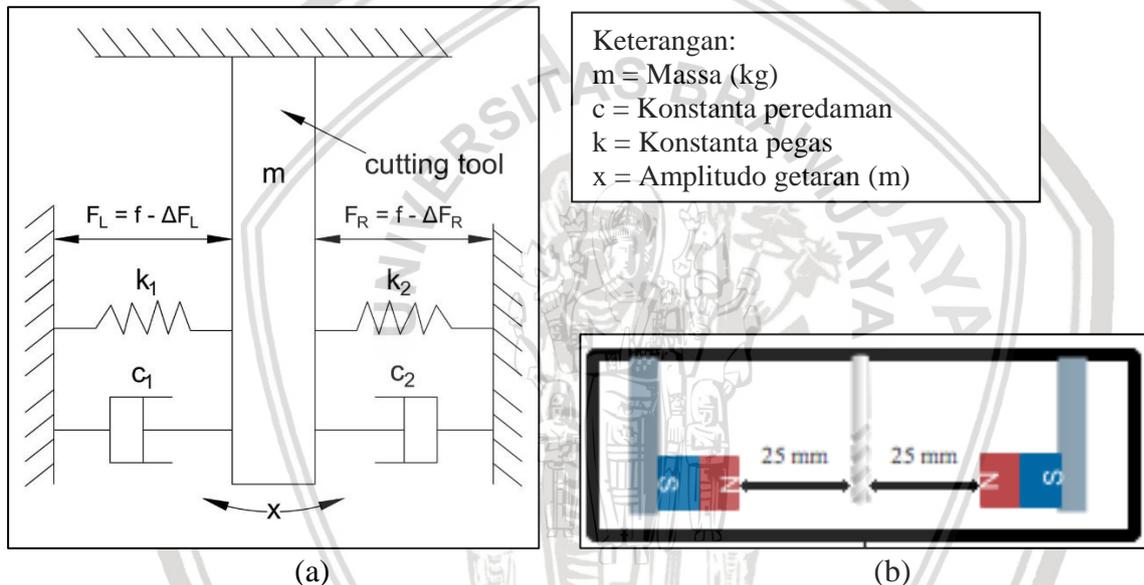
x = Amplitudo getaran (m)

ω = Frekuensi angular dari gaya harmonik (rad/s)

F_0 = Gaya yang mengeksitasi/*Cutting Force* (N)

Sumber : Rao (2011, p.271)

Permodelan SDOF *system* diterapkan pada penelitian ini dengan magnet sebagai peredam menghasilkan *free body diagram* sebagai berikut



Gambar 2.15 Sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) dengan Magnet Permanen (a) dan Skema Pemasangannya (b)

Displacement yang dihasilkan oleh *cutting tool* terdorong oleh gaya yang dihasilkan magnet. *Repulsive force* menyebabkan pahat tetap berada di titik keseimbangannya dan menghasilkan persamaan

$$F_L = f - \Delta F_L \dots\dots\dots(2-12a)$$

$$F_R = f - \Delta F_R \dots\dots\dots(2-12b)$$

keterangan:

F_L = Gaya yang dihasilkan oleh magnet di sebelah kiri pahat (N)

F_R = Gaya yang dihasilkan oleh magnet di sebelah kanan pahat (N)

f = Gaya eksitasi eksternal yang dihasilkan *cutting tool* (N)

Sumber : Nandi (2011, p.725)

Gaya eksitasi eksternal yang dihasilkan *cutting tool* sama dengan *cutting force* pada persamaan 2-11, sehingga

$$f = F_0 \dots\dots\dots (2-13)$$

Gaya total (F_{total}) yang dihasilkan oleh sistem memiliki persamaan berikut

$$F_{\text{total}} = F_0 + F_{\text{repulsive}} \dots\dots\dots (2-14)$$

Gaya tolak ($F_{\text{repulsive}}$) sebagai gaya peredam yang dihasilkan dari kedua gaya magnet di kiri dan kanan *cutting tool* menjadi pengurang pada *cutting force* ($f = F_0$)

$$F_{\text{repulsive}} = -(\Delta F_L + \Delta F_R) \dots\dots\dots (2-15)$$

Mensubstitusi persamaan 2-15 ke dalam persamaan 2-14, persamaan gaya total menjadi

$$F_{\text{total}} = F_0 - (\Delta F_L + \Delta F_R) \dots\dots\dots (2-16)$$

Nilai amplitudo getaran dapat diperoleh berdasarkan permodelan SDOF *system* dengan magnet sebagai peredam yang memiliki persamaan

$$m\ddot{x} + (c_1 + c_2)\dot{x} + (k_1 + k_2)x = F_{\text{total}} \dots\dots\dots (2-17)$$

$$x = \frac{F_{\text{total}}}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (2-18)$$

$$= \frac{F_0 - (\Delta F_L + \Delta F_R)}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}}$$

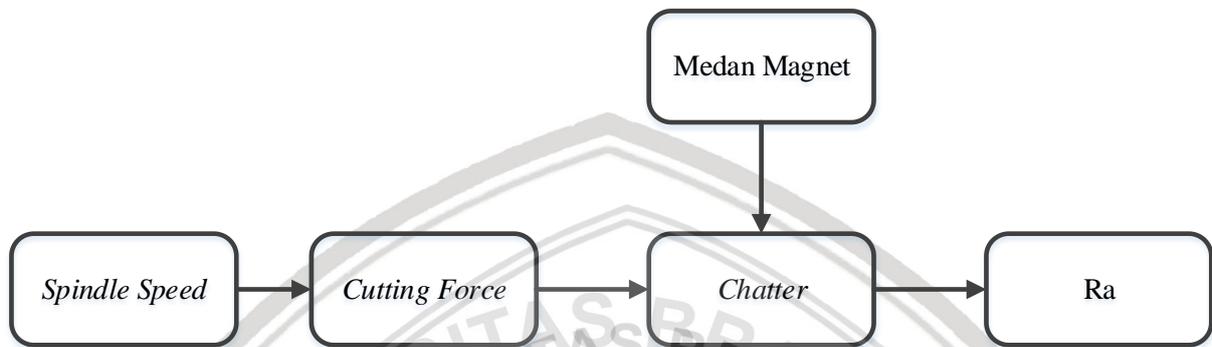
Persamaan 2-18 membuktikan bahwa besarnya nilai $F_{\text{repulsive}}$ yang menjadi pengurang nilai *cutting force* (F_0) berpengaruh dalam menurunkan nilai amplitudo getaran tergantung pada seberapa besar kekuatan yang dihasilkan dua magnet permanen identik yang dipasang pada kiri dan kanan *cutting tool*.

2.8 Kerangka Penelitian

Dari tinjauan pustaka dapat disimpulkan bahwa parameter permesinan yaitu *spindle speed* memiliki pengaruh pada proses permesinan. Besarnya *spindle speed* akan mempengaruhi nilai *feed per tooth*, yang mana nilai *feed per tooth* akan mempengaruhi nilai *tangential* dan *normal cutting force*. Besarnya *cutting force* dapat diketahui melalui persamaan 2-6.

Chatter menentukan bagaimana geometri yang dihasilkan pada permukaan benda kerja, dimana geometri tersebut menjadi tolak ukur kualitas benda kerja yang diproses sesuai dengan apa yang dijabarkan pada tinjauan pustaka.

Pengaplikasian medan magnet dalam meredam *chatter* yang terjadi juga akan mempengaruhi kualitas dari suatu permukaan benda kerja.



Gambar 2.16 Kerangka Penelitian

2.9 Hipotesis

Berdasarkan latar belakang, tinjauan pustaka, dan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dibuat, maka peneliti dapat menarik hipotesis penelitian, yaitu:

1. Nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*.
2. Nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed* dengan pengaplikasian medan magnet pada operasi permesinannya.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental bertujuan untuk mencari pengaruh dari variasi *spindle speed* pada proses *slot milling* menggunakan mesin CNC *Micromill* memanfaatkan medan magnet permanen untuk pengendalian *chatter* terhadap kekasaran permukaan Aluminium.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya dan untuk pengukuran kekasaran permukaan dilakukan di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya pada tanggal 16 April 2018 sampai 15 Mei 2018.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang tidak dipengaruhi oleh pengaruh lain.

Variabel bebas yang digunakan adalah

Tabel 3.1
Variabel Bebas

Proses Pemakanan	<i>Spindle Speed</i> (rpm)		
Tanpa Peredaman	2400	2600	2800
Dengan Peredaman	2400	2600	2800

2. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas.

Variabel terikat dari penelitian ini adalah kekasaran permukaan (R_a)

3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang nilainya dijaga agar tetap konstan selama penelitian. Variabel terkontrol yang digunakan antara lain :

- Diameter *end mill* = 4 mm
- Depth of cut = 0,5 mm
- Feed Rate = 50 mm/menit
- Magnet Permanen = 12000 gauss

3.4 Alat dan Bahan

1. Mesin Denford *Micromill* CNC Milling dan Komputer

Mesin Denford *Micromill* CNC Milling merupakan mesin yang digunakan dalam penelitian ini dan komputer digunakan untuk mengendalikan dan mensimulasikan jalannya pahat dari mesin Denford *Micromill* CNC Milling melalui *software* VRMilling5.



Gambar 3.1 Mesin Denford *Micromill* CNC Milling

Sumber : Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

- a. Merek = Denford
- b. Jenis = *Micromill* CNC Milling
- c. Model = CNC - 3 Axis
- d. *Mechanical Details*
 - Machine length = 685 mm
 - Machine depth = 654 mm

- *Machine height* = 688 mm
- *Table size* = 70 mm x 330 mm
- *Travel X axis* = 228 mm
- *Travel Y axis* = 130 mm
- *Travel Z axis* = 160 mm
- *Max. spindle speed* = 3000 rpm
- *Max. feed rate* = 750 mm/min
- *Main supply requirements* = *Single phase*
- *Spindle motor* = 0.075 kW

2. *Surface Roughness*

Alat ini digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan benda yang akan diteliti per titikny.



Gambar 3.2 *Surface Roughness Tester SJ-301*

Sumber : Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

- a. Merk = Mitutoyo
- b. *Measuring range* = X axis (12.5 mm) dan Z axis (350 μ m)
- c. *Stylus tip material* = *Diamond*
- d. Dimensi = 325 mm x 185 mm x 95 mm

3. Pahat

Pahat digunakan sebagai *cutting tool* dalam melakukan proses *slot-milling* pada penelitian ini dan memiliki spesifikasi sebagai berikut

- a. Merk = BSW
- b. Tipe = *Square End Mill*
- c. *Cutting Edge Diameter* = 4 mm
- d. Jumlah *flute* = 4 buah
- e. Material = HSS-Co 8%
- f. *Helix Angle* = 30°
- g. *Shank Diameter* = 6 mm
- h. *Flute length* = 18 mm
- i. *Overall length* = 56 mm



Gambar 3.3 Square End Mill Diameter 4 mm

Sumber : Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

4. *Vibration meter*

Alat ini digunakan untuk mengukur seberapa besar getaran yang dihasilkan oleh *cutting tool* selama proses permesinan berlangsung.



Gambar 3.4 Vibration Meter

Sumber : Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

- a. *Vibration pick up* = *Piezoelectric ceramic accelerometer*
- b. *Measurement range of acceleration* = 0.1 – 199.9 mm/s² *peak*
- c. *Measurement range of velocity* = 0.1 – 199.9 m/s rms
- d. *Measurement accuracy* = $\pm 5\% \pm 2$ *digits*
- e. *Measurement frequency range of acceleration* = 10 Hz – 1 KHz (LO) 1 KHz – 15 KHz (HI)
- f. *Measurement frequency range of velocity* = 10 Hz – 1 KHz (LO)
- g. *Measurement frequency range of displacement* = 10 Hz – 1 KHz (LO)
- h. Dimensi = 67 x 30 x 183 mm
- i. Massa = 182 gram (termasuk baterai)

5. *Height Gauge*



Gambar 3.5 Height Gauge

Sumber : Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

6. Magnet Permanen



Gambar 3.6 Neodymium Magnet

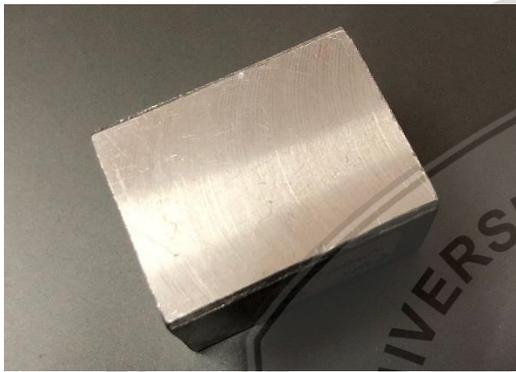
Sebagai sumber medan magnet dalam metode peredaman (*damping*) pada penelitian ini. *Neodymium* magnet memiliki spesifikasi

- Bahan = NdFeB

- *Maximum energy product* = 35 mGOe (megaGauss Oersted)
- *Residual induction* = 12000 Gauss
- *Coercivity* = 11600 Oe

7. Aluminium

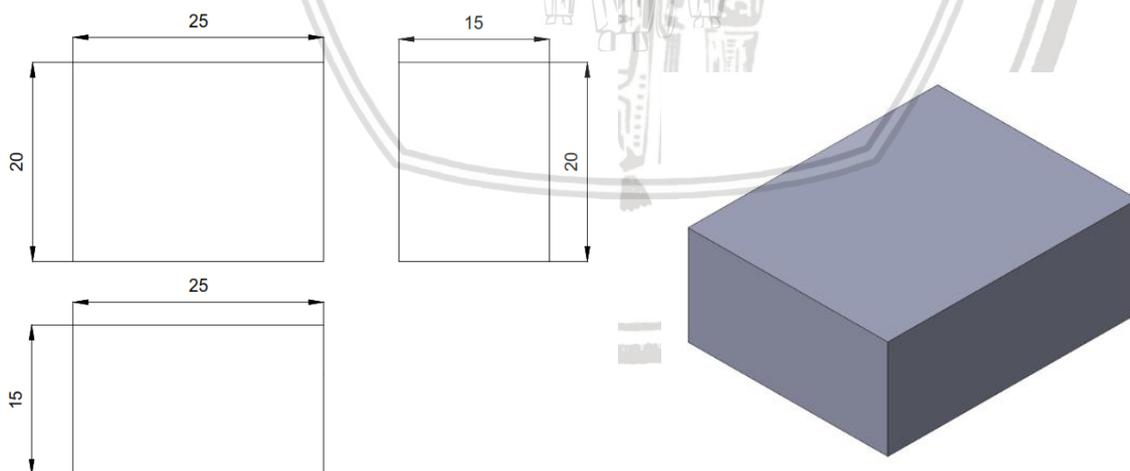
Digunakan sebagai *workpiece* untuk penelitian ini yang dipasang pada mesin Denford *Micromill CNC Milling*.



Gambar 3.7 Benda Kerja Aluminium

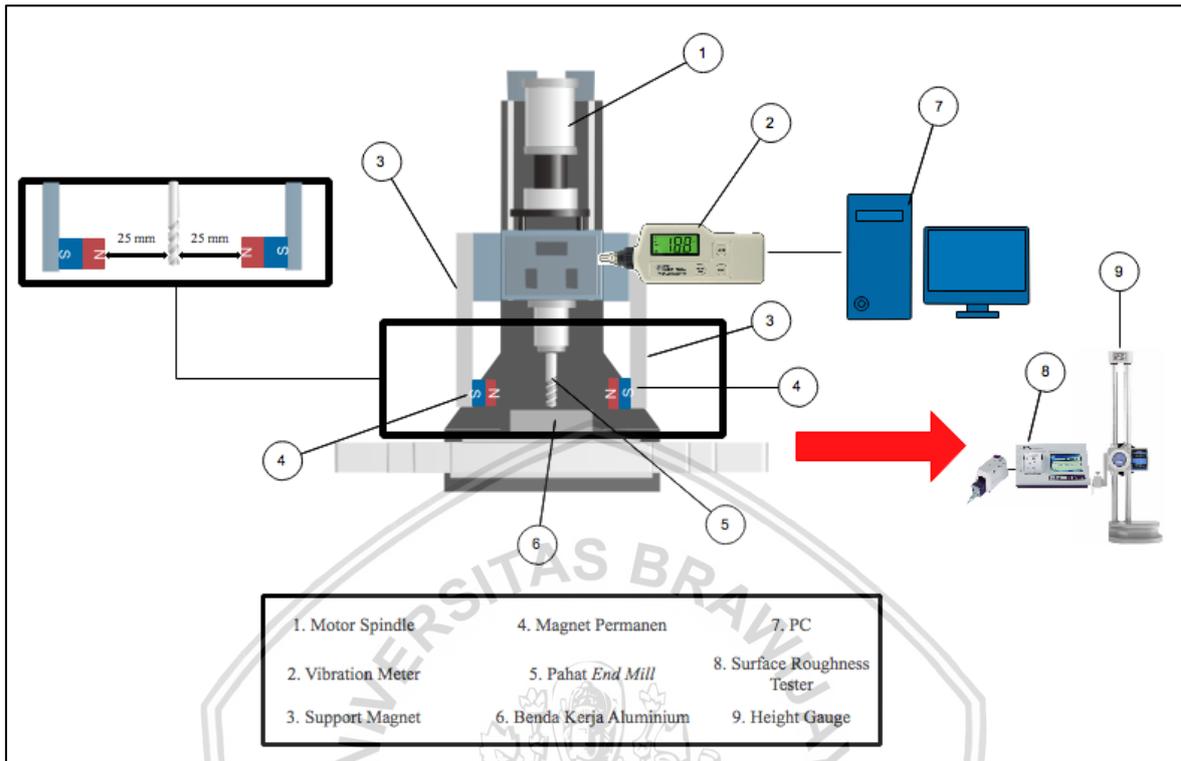
Sumber : Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2018)

3.5 Dimensi Benda Kerja



Gambar 3.8 Dimensi Benda Kerja dalam mm

3.6 Skema Penelitian



Gambar 3.9 Skema Penelitian

Benda kerja aluminium (6) dipasang pada tepat di bawah pahat *end mill* (5) yang digunakan sebagai *cutting tool* dalam proses *slot milling*. Proses pemakanan dimulai tanpa adanya pengaplikasian medan magnet dimulai dengan menggerakkan *motor spindle* (1) yang digerakkan oleh arus listrik. Proses pemakanan berikutnya dilakukan dengan memasang magnet permanen (4) pada *support magnet* (3) di sebelah kiri dan kanan *cutting tool*. Selama proses pemakanan diambil data *displacement* menggunakan *vibration meter* (2) yang terhubung pada PC/komputer (7) yang berguna sebagai penyimpan data yang diterima oleh *vibration meter* (2). Setelah proses pemakanan selesai, benda kerja aluminium (6) diletakkan pada *height gauge* (9) dan dilakukan pengujian kekasaran permukaan menggunakan *surface roughness tester* dengan panjang pengambilan data sepanjang 1,25 mm (8).

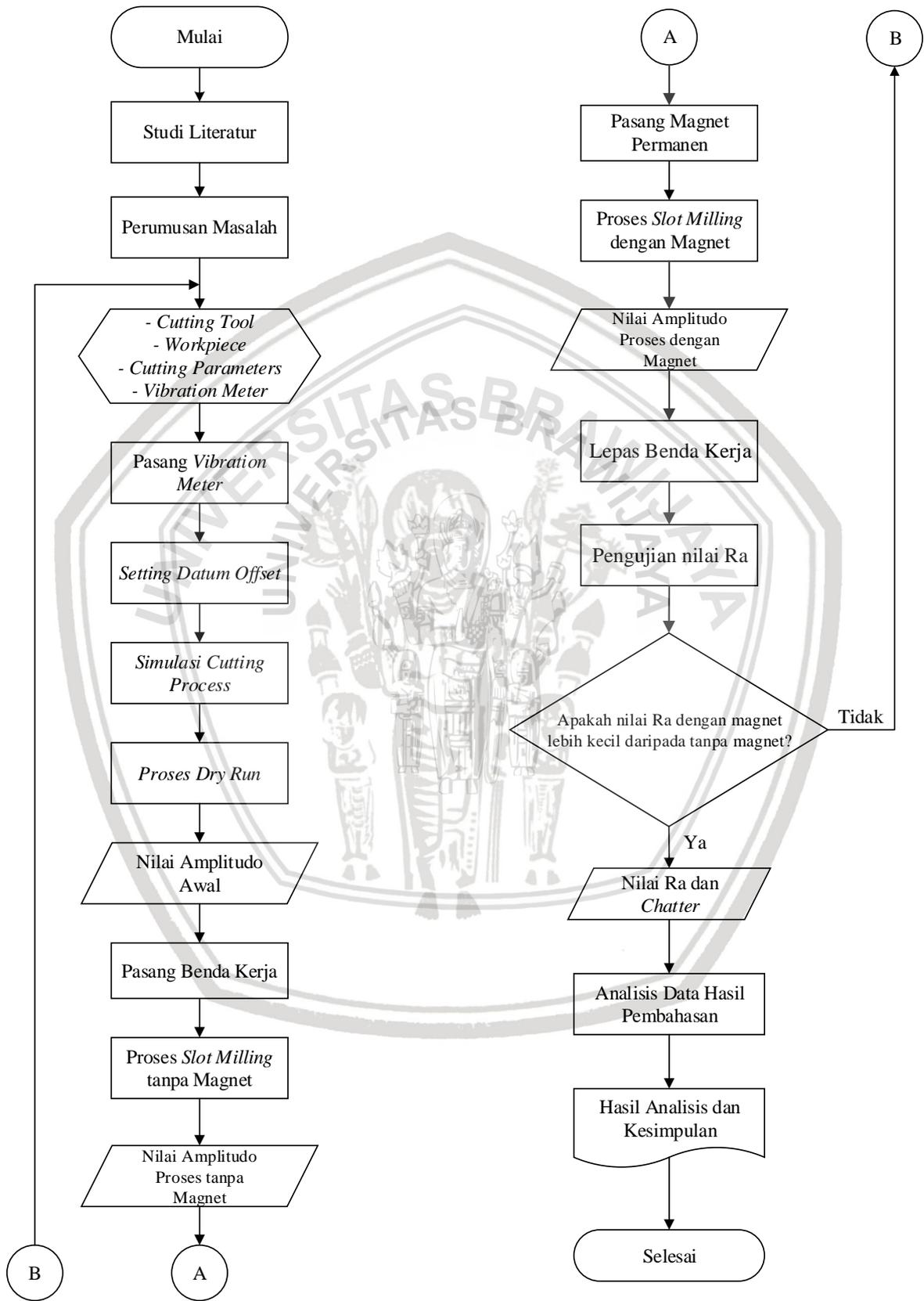
3.7 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini dibagi menjadi dua macam, pertama tanpa menggunakan magnet permanen dan kedua dengan menggunakan magnet

permanen. Langkah penelitian tanpa menggunakan magnet permanen adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan pahat *square end mill* diameter 4 mm, *vibration meter*, dan benda kerja yaitu Aluminium berdimensi 50 x 25 x 15 mm.
2. Memasang *vibration meter* pada sisi samping kiri *machine head* dari mesin.
3. Mempersiapkan mesin Denford CNC *Micromill* dengan cara:
 - Mendesain garis pada sumbu Y dengan panjang 5 mm dan X dengan Panjang 0.5 mm pada *software* QuickCAM2D.
 - Melakukan simulasi *cutting process* dan penentuan *datum offset* pada *software* VRMilling5.
4. Mencari nilai amplitudo awal dengan melakukan proses *dry run*.
5. Memasang benda kerja pada ragum dari mesin Denford CNC *Micromill*, kemudian cari *datum offset* nya.
6. Mengeksekusi proses permesinan tanpa magnet menggunakan variabel yang sudah ditentukan.
7. Mendapatkan nilai amplitudo proses permesinan tanpa magnet.
8. Memasang magnet permanen pada sisi kiri dan kanan *machine head* pada mesin CNC *Micromill*.
9. Mengeksekusi proses permesinan dengan magnet menggunakan variabel yang sudah ditentukan.
10. Mendapatkan nilai amplitudo proses permesinan dengan magnet.
11. Melepaskan benda kerja yang telah dilakukan proses permesinan dari ragum.
12. Memasang benda kerja pada *height gauge* untuk melakukan pengujian nilai kekasaran permukaan (Ra) menggunakan *surface roughness tester*.
13. Apakah nilai Ra yang didapat pada proses dengan magnet lebih kecil daripada proses dengan magnet?
 - Jika ya, maka lanjut ke langkah 14.
 - Jika tidak, maka kembali ke langkah 5.
14. Mendapat nilai kekasaran permukaan (Ra) dan *chatter*.
15. Melakukan pengolahan data dan menganalisis grafik dari data tersebut.
16. Mendapatkan hasil dari analisis dan kesimpulan.

3.8 Diagram Alir Penelitian

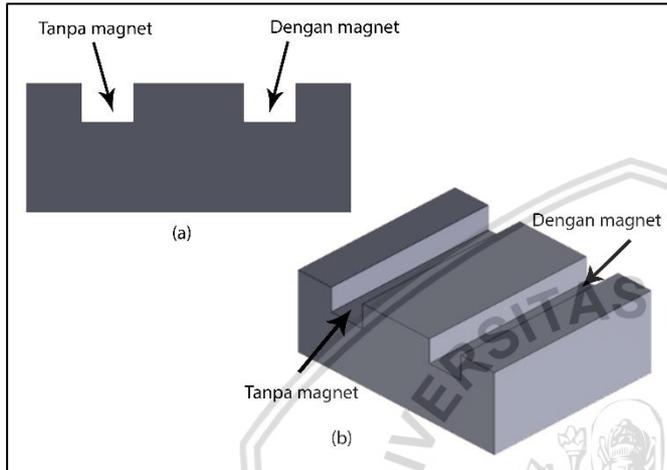


3.9 Rencana Penelitian

1. Proses pemakanan

Proses permesinan yang dilakukan adalah *slot milling* dengan ketentuan sebagai berikut:

- Panjang pemakanan : 20 mm
- Lebar pemakanan : 4 mm
- Dalamnya pemakanan : 0,5 mm



Gambar 3.10 Proses Pemakanan Tampak Depan (a) dan Tampak Isometris (b)

2. Pengambilan Data

Panjang pemakanan sebesar 20 mm untuk satu proses membutuhkan waktu pemakanan selama 24 detik ($feed\ rate = 50\ mm/min$). *Workpiece* dibagi atas 5 segmen dimana setiap segmennya memiliki panjang 3 mm. Di tiap segmen akan diambil sampel amplitudo dan nilai *spectrum frequency* dengan rincian tiap segmen:

- Segmen 1, pada waktu permesinan $t = 4,2$ detik dengan rentang $2,4 \leq t \leq 6$ (B)
- Segmen 2, pada waktu permesinan $t = 7,8$ detik dengan rentang $6 \leq t \leq 9,6$ (E)
- Segmen 3, pada waktu permesinan $t = 11,4$ detik dengan rentang $9,6 \leq t \leq 13,2$ (H)
- Segmen 4, pada waktu permesinan $t = 15$ detik dengan rentang $13,2 \leq t \leq 16,8$ (K)
- Segmen 5, pada waktu permesinan $t = 18,6$ detik dengan rentang $16,8 \leq t \leq 20,4$ (N)

Berdasarkan kapasitas *stylus surface roughness tester* yang memiliki panjang 1,25 mm dan menggunakan $feed\ rate$ sebesar 50 mm/min atau 0,8 mm/detik, perhitungan rentang pengambilan data nilai Kekasaran Permukaan $Ra(x)$ adalah sebagai berikut:

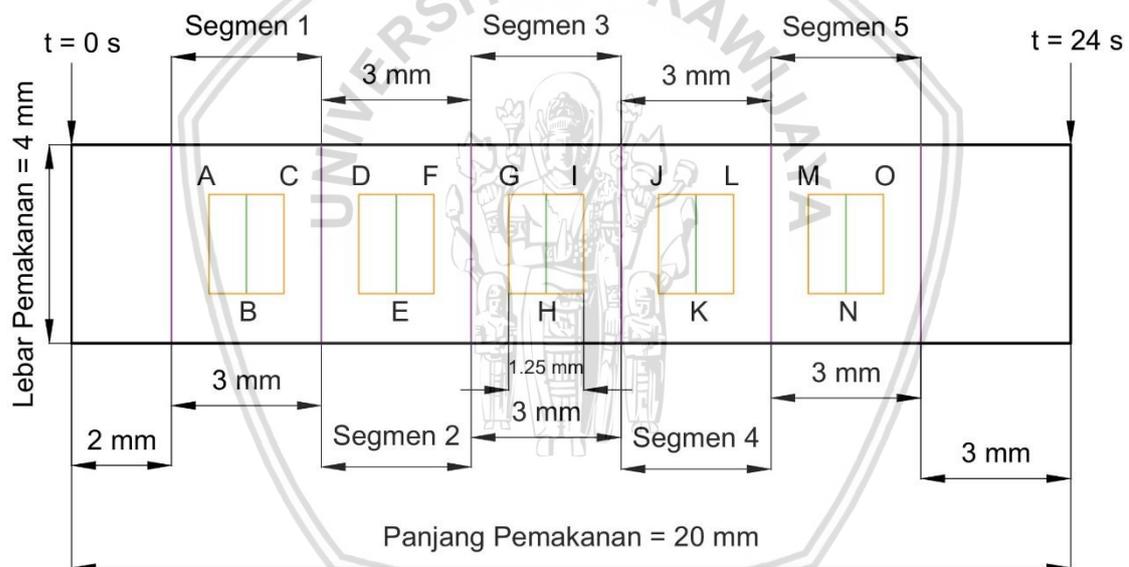
$$\frac{1\ \text{detik}}{x} = \frac{0,8\ \text{mm}}{\text{panjang stylus}}$$

$$\frac{1 \text{ detik}}{x} = \frac{0,8 \text{ mm}}{1,25 \text{ mm}}$$

$$x = 1,5 \text{ detik}$$

Ditinjau dari titik tengah tiap segmen pengambilan data, rentang waktu pengambilan data Ra pada tiap segmen memiliki rincian:

- Segmen 1, pada waktu permesinan $t = 3,45 - 4,95$ detik (A-C)
- Segmen 2, pada waktu permesinan $t = 7,05 - 8,55$ detik (D-F)
- Segmen 3, pada waktu permesinan $t = 10,65 - 12,15$ detik (G-I)
- Segmen 4, pada waktu permesinan $t = 14,25 - 15,75$ detik (J-L)
- Segmen 5, pada waktu permesinan $t = 17,85 - 19,35$ detik (M-O)



Keterangan:

- : Rentang Segmen
- : Pengambilan Data Kekasaran Permukaan
- : Pengambilan Data *Spectrum Frequency*

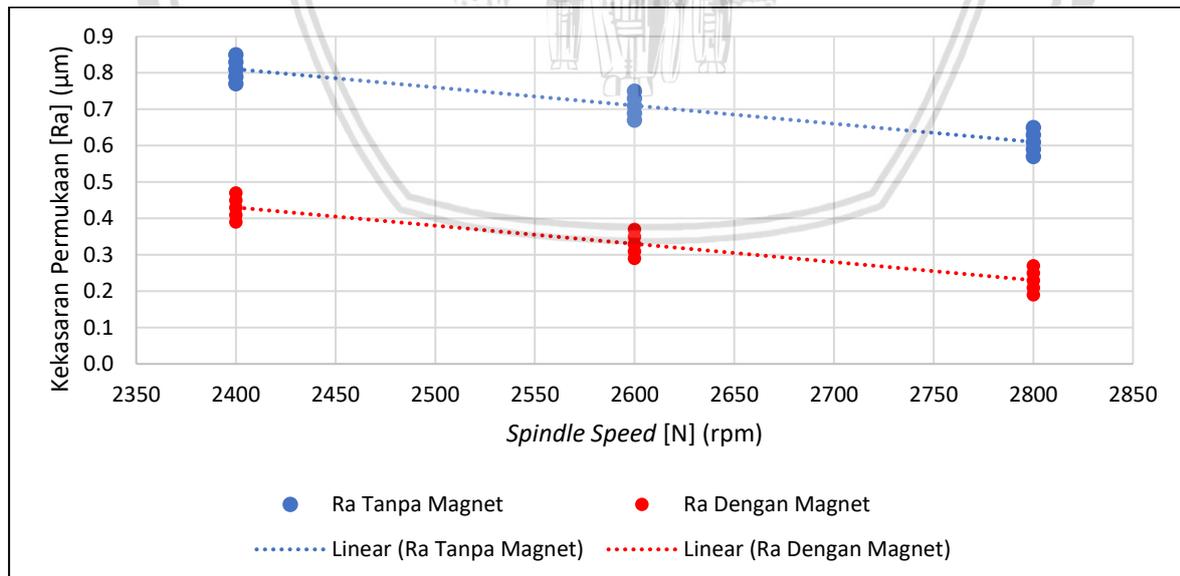
Gambar 3.11 Pembagian Segmen Pengambilan Data

Tabel 3.2
Rancangan Pengambilan Data Ra

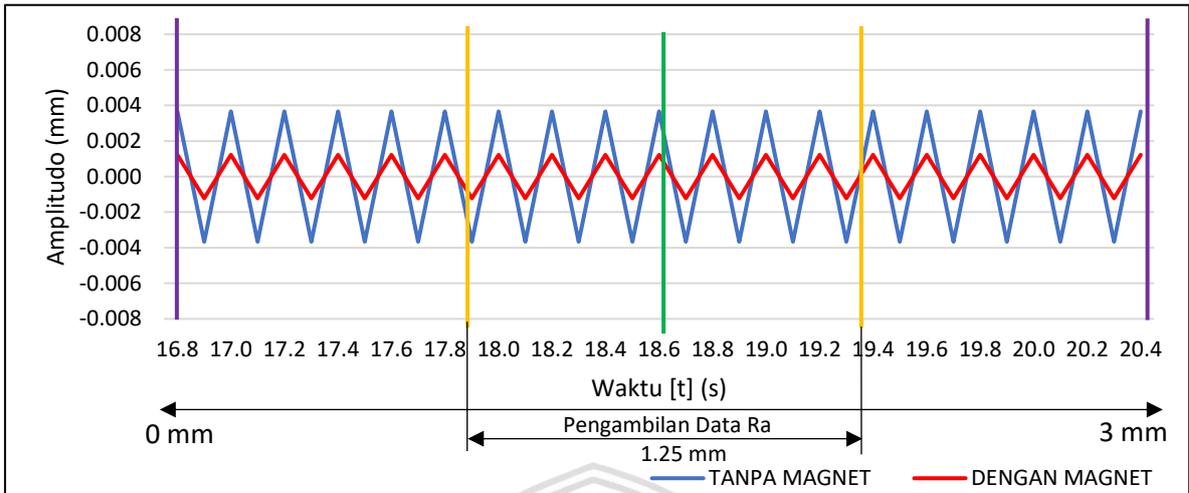
No	Spindle Speed [N] (rpm)	Ra tanpa Magnet (μm)	Rata-rata Ra (μm)	Ra dengan magnet (μm)	Rata-rata Ra (μm)
1	2400	Ra tm ₁	\bar{x} Ra ₁	Ra dm ₁	\bar{x} Ra ₄
2		Ra tm ₂		Ra dm ₂	
3		Ra tm ₃		Ra dm ₃	
4		Ra tm ₄		Ra dm ₄	
5		Ra tm ₅		Ra dm ₅	
1	2600	Ra tm ₆	\bar{x} Ra ₂	Ra dm ₆	\bar{x} Ra ₅
2		Ra tm ₇		Ra dm ₇	
3		Ra tm ₈		Ra dm ₈	
4		Ra tm ₉		Ra dm ₉	
5		Ra tm ₁₀		Ra dm ₁₀	
1	2800	Ra tm ₁₁	\bar{x} Ra ₃	Ra dm ₁₁	\bar{x} Ra ₆
2		Ra tm ₁₂		Ra dm ₁₂	
3		Ra tm ₁₃		Ra dm ₁₃	
4		Ra tm ₁₄		Ra dm ₁₄	
5		Ra tm ₁₅		Ra dm ₁₅	

3. Pengolahan Data

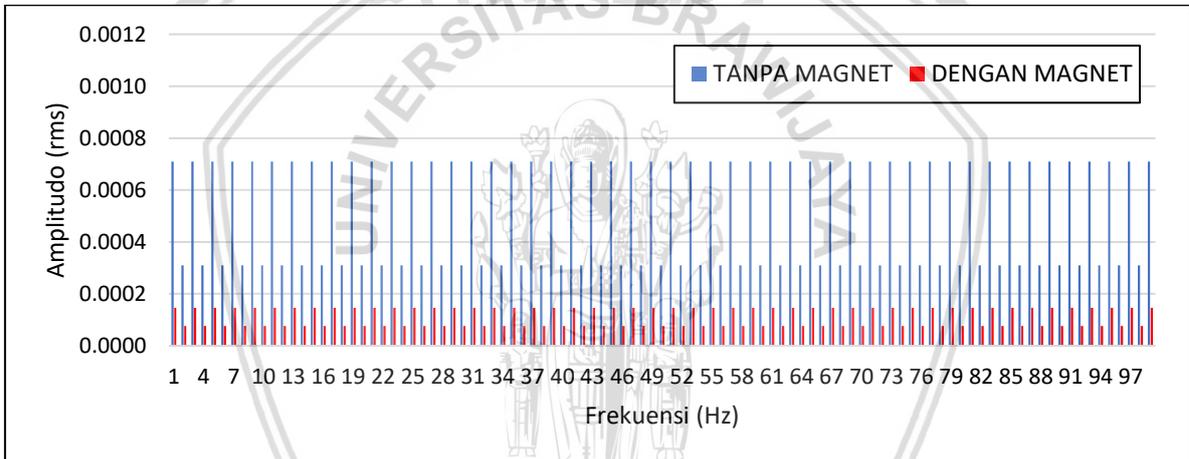
Pada penelitian ini didapat data berupa nilai Ra dan Amplitudo getaran yang nantinya diolah menjadi grafik lalu dianalisis.



Gambar 3.12 Rencana Grafik Kekasaran Permukaan Ra terhadap Spindle Speed



Gambar 3.13 Rencana Grafik Amplitudo



Gambar 3.14 Rencana Grafik Power Spectrum Frequency



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Setelah dilakukan proses permesinan *slot milling* tanpa dan dengan medan magnet dengan variasi *spindle speed* 2400, 2600, dan 2800 rpm, dilakukan pengujian kekasaran permukaan benda kerja yang bertempat di Laboratorium Metrologi Industri Universitas Brawijaya. Alat yang digunakan dalam mengukur kekasaran permukaan (Ra) adalah *Surface Roughness Tester* SJ-301. Setiap benda kerja dibagi atas 5 segmen untuk dijadikan sampel nilai kekasaran permukaan. Data kekasaran yang didapat dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1
Hasil Penelitian Nilai Kekasaran Permukaan (Ra)

No	<i>Spindle Speed</i> [N] (rpm)	Ra tanpa Magnet (μm)	Rata-rata Ra (μm)	Ra dengan magnet (μm)	Rata-rata Ra (μm)
1	2400	0,643	0,587	0,432	0,450
2		0,415		0,542	
3		0,624		0,412	
4		0,764		0,432	
5		0,819		0,432	
1	2600	0,564	0,545	0,391	0,375
2		0,496		0,341	
3		0,489		0,391	
4		0,446		0,373	
5		0,731		0,381	
1	2800	0,511	0,412	0,321	0,332
2		0,445		0,323	
3		0,333		0,304	
4		0,386		0,358	
5		0,384		0,353	

4.2 Analisis Data Model Regresi Linear

Analisis data model regresi linear dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu atau beberapa variabel terhadap satu buah variabel melalui persamaan linear. Variabel yang mempengaruhi disebut dengan variabel bebas, pada penelitian ini yaitu *spindle speed* dan variabel yang dipengaruhi adalah variabel terikat, yaitu kekasaran permukaan (R_a). Bentuk sederhana dari persamaan linear adalah sebagai berikut

$$Y_i = \alpha + \beta X_i \dots\dots\dots(4-1)$$

keterangan:

- Y_i = Variabel terikat
- X_i = Variabel bebas
- β = Eksponen variabel
- α = Konstanta

Sumber : Benoit (2011, p.1)

Kekasaran permukaan (R_a) sebagai variabel terikat dipengaruhi oleh *spindle speed* (n), *feed rate* (V_f), dan *axial depth of cut* (a_p). Qehaja et al. (2015), Sahin dan Motorcu (2004) memodelkan fungsi R_a sebagai persamaan non-linear yang memiliki bentuk seperti berikut

$$R_a = N^{\beta_1} \cdot v_f^{\beta_2} \cdot a_p^{\beta_3} \cdot C$$

dengan $\beta_{1,2,3}$ adalah eksponen masing-masing variabel dan C adalah konstanta. Karena persamaan di atas memiliki sifat non-linear sehingga diperlukan transformasi logaritma untuk memenuhi persamaan 4-1, maka persamaan menjadi

$$\log R_a = \beta_1 \log N + \beta_2 \log v_f + \beta_3 \log a_p + \log C$$

Dikarenakan *Feed rate* (V_f) dan *axial depth of cut* (a_p) berperan sebagai variabel terkontrol pada penelitian ini sehingga dapat dianggap konstan sesuai pada persamaan berikut

$$\log C + \beta_2 \log v_f + \beta_3 \log a_p = \text{konstan} = \alpha$$

maka

$$\log R_a = \beta_1 \log N + \alpha$$

Untuk mempermudah analisis data model regresi linear, persamaan diatas disubstitusikan menjadi

$$Y = \beta_1 X + \alpha$$

dimana:

$$Y = \log R_a$$

$$X = \log n$$

4.2.1 Analisis Data Model Regresi Linear Variabel Bebas *Spindle Speed* terhadap Variabel Terikat Kekasaran Permukaan (R_a) tanpa Medan Magnet

Tabel 4.2

Data Korelasi Proses tanpa Pengaplikasian Medan Magnet

r_{xy}	β_1	α
-0,689	-2,881	9,549

Tabel 4.2 menunjukkan koefisien korelasi (r_{xy}) memiliki nilai -0,689. Hasil data di atas mengindikasikan bahwa hubungan variabel *spindle speed* pada proses permesinan tanpa medan magnet terhadap kekasaran permukaan (R_a) adalah sebesar 68,9%. Sehingga persamaan linear yang dapat dibentuk berdasarkan data di tabel 4.2 adalah

$$Y = -2,881 X + 9,549$$

Persamaan linear di atas disubstitusikan kembali ke persamaan aslinya menjadi

$$\log R_a = -2,881 \log N + 9,549$$

$$R_a = N^{-2,881} \cdot 35419557234$$

Tabel 4.3

Data Determinasi Proses tanpa Pengaplikasian Medan Magnet

No	Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}	R^2
1	Model	0,093	1	0,093			
2	Error	0,104	13	0,008	11,737	4,67	0,4745
3	Total	0,196	14	0,014			

Sesuai dengan data di Tabel 4.3, nilai F_{hitung} yang lebih besar daripada F_{tabel} . Hal ini menunjukkan bahwa persamaan regresi linear memiliki pengaruh yang signifikan terhadap data kekasaran permukaan (R_a). Nilai R^2 pada tabel menunjukkan kesesuaian model persamaan linear variabel bebas *spindle speed* dengan rentang nilai 2400 – 2600 rpm terhadap kekasaran permukaan (R_a) pada proses permesinan tanpa medan magnet sebesar 47,45 %.

4.2.2 Analisis Data Model Regresi Linear Variabel Bebas *Spindle Speed* terhadap Variabel Terikat Kekasaran Permukaan (R_a) dengan Medan Magnet

Tabel 4.4
Data Korelasi Proses dengan Pengaplikasian Medan Magnet

r_{xy}	β_1	α
-0,86	-1,961	6,275

Tabel 4.4 menunjukkan koefisien korelasi (r_{xy}) memiliki nilai -0,86. Hasil data di atas mengindikasikan bahwa hubungan variabel *spindle speed* pada proses permesinan tanpa medan magnet terhadap *surface roughness* (R_a) adalah sebesar 86%. Sehingga persamaan linear yang dapat dibentuk berdasarkan data di tabel 4.2 adalah

$$Y = -1,961 X + 6,275$$

Persamaan linear di atas disubstitusikan kembali ke persamaan aslinya menjadi

$$\log R_a = -1,961 \log N + 6,275$$

$$R_a = N^{-1,961} \cdot 1885173,378$$

Tabel 4.5
Data Determinasi Proses dengan Pengaplikasian Medan Magnet

No	Sumber	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}	R^2
1	Model	0,043	1	0,043			
2	Error	0,015	13	0,001	36,851	4,67	0,7392
3	Total	0,058	14	0,004			

Sesuai dengan data di Tabel 4.5, nilai F_{hitung} yang lebih besar daripada F_{tabel} . Hal ini menunjukkan bahwa persamaan regresi linear memiliki pengaruh yang signifikan terhadap data kekasaran permukaan (R_a). Nilai R^2 pada tabel menunjukkan kesesuaian model persamaan linear variabel bebas *spindle speed* dengan rentang nilai 2400 – 2600 rpm terhadap kekasaran permukaan (R_a) pada proses permesinan tanpa medan magnet sebesar 73,92%.

4.3 Uji T

Pada pembahasan penelitian ini, uji T dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses permesinan dengan dan tanpa medan magnet. Uji T dilakukan pada setiap parameter permesinan *spindle speed* yang digunakan pada penelitian ini, yaitu 2400, 2600, dan 2800 rpm

Untuk dapat memulai Uji T, perlu adanya penentuan hipotesis awal (H_0) dan hipotesis alternatif (H_a), dimana kedua hipotesis tersebut dalam penelitian ini adalah

- H_0 , yaitu nilai R_a (μm) dengan magnet $>$ daripada nilai R_a (μm) tanpa magnet.
- H_a , yaitu nilai R_a (μm) dengan magnet $<$ daripada nilai R_a (μm) tanpa magnet.

Hipotesis H_0 dapat ditolak dan H_a dapat diterima jika nilai T_{hitung} lebih kecil daripada $-T_{\alpha}$ dengan tingkat signifikansi 95%. Sebaliknya, hipotesis H_0 dapat diterima dan H_a dapat ditolak jika nilai T_{hitung} lebih besar daripada $-T_{\alpha}$ dengan tingkat signifikansi yang sama. Ditolaknya H_0 artinya penentuan proses permesinan dengan pengaplikasian medan magnet menghasilkan nilai R_a yang lebih kecil.

4.3.1 Uji T Variabel *Spindle Speed* 2400 rpm

Tabel 4.6

Data Uji T variabel *Spindle Speed* 2400 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) Magnet

Avg. X_1	Avg. X_2	Avg. X_2 - Avg. X_1	T_{hitung}	$-T_{\alpha}$
0,653	0,45	-0,203	-2,758	-1,86

Berdasarkan uji T yang didapat, $T_{\text{(hitung)}}$ yang lebih kecil dari $-T_{\alpha}$ dengan tingkat signifikansi 95%. Hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima, Hal ini menunjukkan bahwa proses permesinan pada *spindle speed* 2400 rpm dengan pengaplikasian medan magnet menghasilkan nilai R_a yang lebih kecil

4.3.2 Uji T Variabel *Spindle Speed* 2600 rpm

Tabel 4.7

Data Uji T variabel *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) Magnet

Avg. X_1	Avg. X_2	Avg. X_2 - Avg. X_1	T_{hitung}	$-T_{\alpha}$
0,731	0,381	-0,35	-5,54	-1,86

Berdasarkan uji T yang didapat, $T_{\text{(hitung)}}$ yang lebih kecil dari $-T_{\alpha}$ dengan tingkat signifikansi 95%. Hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima, Hal ini menunjukkan

bahwa proses permesinan pada *spindle speed* 2600 rpm dengan pengaplikasian medan magnet menghasilkan nilai R_a yang lebih kecil.

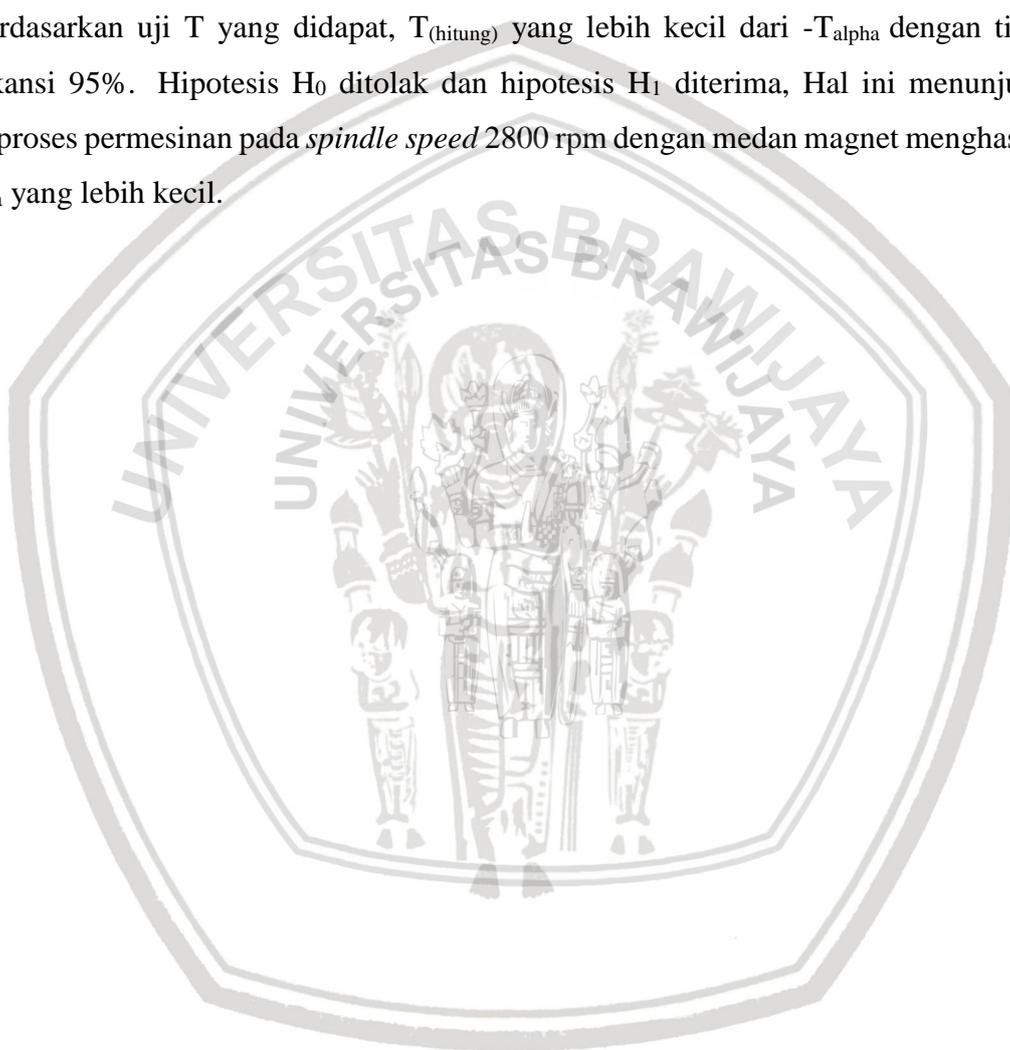
4.3.3 Uji T Variabel *Spindle Speed* 2800 rpm

Tabel 4.8

Data Uji T variabel *Spindle Speed* 2800 rpm tanpa (X_1) dan dengan (X_2) Magnet

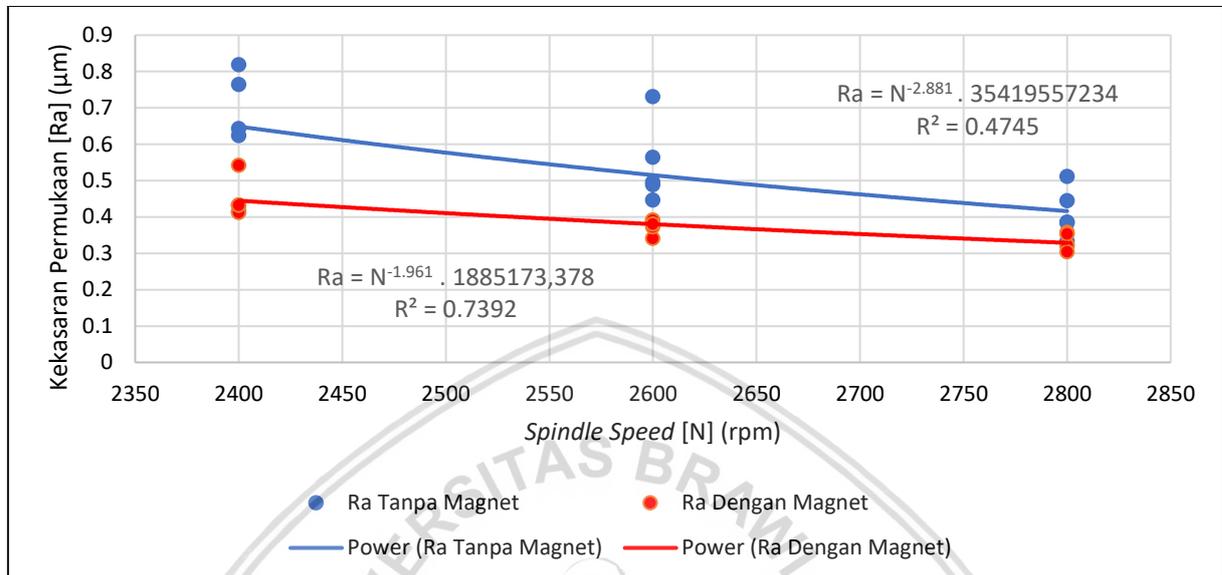
Avg. X_1	Avg. X_2	Avg. X_2 - Avg. X_1	T_{hitung}	$-T_{alpha}$
0,497	0,353	-0,144	-2,14	-1,86

Berdasarkan uji T yang didapat, $T_{(hitung)}$ yang lebih kecil dari $-T_{alpha}$ dengan tingkat signifikansi 95%. Hipotesis H_0 ditolak dan hipotesis H_1 diterima, Hal ini menunjukkan bahwa proses permesinan pada *spindle speed* 2800 rpm dengan medan magnet menghasilkan nilai R_a yang lebih kecil.



4.4 Grafik dan Pembahasan

4.4.1 Grafik dan Pembahasan Pengaruh *Spindle Speed* terhadap Kekasaran Permukaan pada Proses *Slot Milling* tanpa dan menggunakan Medan Magnet



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Variasi Nilai *Spindle Speed* dan Pengaplikasian Medan Magnet terhadap Kekasaran Permukaan

Berdasarkan grafik yang terdapat pada Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa sumbu X pada grafik merepresentasikan variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini yaitu *spindle speed* dengan satuan *revolution per minute* (rpm) dan sumbu Y pada grafik merepresentasikan variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini yaitu kekasaran permukaan dengan satuan μm . Titik berwarna biru melambangkan nilai kekasaran permukaan untuk *spindle speed* tertentu pada proses *slot milling* tanpa medan magnet dan garis biru merupakan garis hasil persamaan regresi linear dari data yang diolah, sedangkan titik merah dan garis merah merepresentasikan nilai kekasaran permukaan untuk *spindle speed* tertentu pada proses *slot milling* dengan magnet dan hasil persamaan regresi linear dari data yang diolah secara berturut-turut.

Sesuai dengan data yang didapat, pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa proses *Slot Milling* dengan medan magnet menghasilkan nilai kekasaran permukaan (R_a) yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa medan magnet dibuktikan dengan letak garis berwarna hijau (R_a dengan magnet) berada di bawah garis berwarna biru (R_a tanpa magnet). Selain itu, nilai *spindle speed* yang semakin meningkat turut berperan dalam menurunkan nilai kekasaran permukaan. Proses *slot milling* tanpa medan magnet dengan nilai *spindle speed*

2400 rpm; 2600 rpm; dan 2800 rpm secara berturut-turut menghasilkan nilai kekasaran rata-rata (Ra) sebesar 0,587 μm ; 0,545 μm ; dan 0,412 μm sedangkan proses *slot milling* dengan medan magnet dengan nilai *spindle speed* yang sama menghasilkan nilai Ra sebesar 0,450 μm ; 0,375 μm ; dan 0,332 μm .

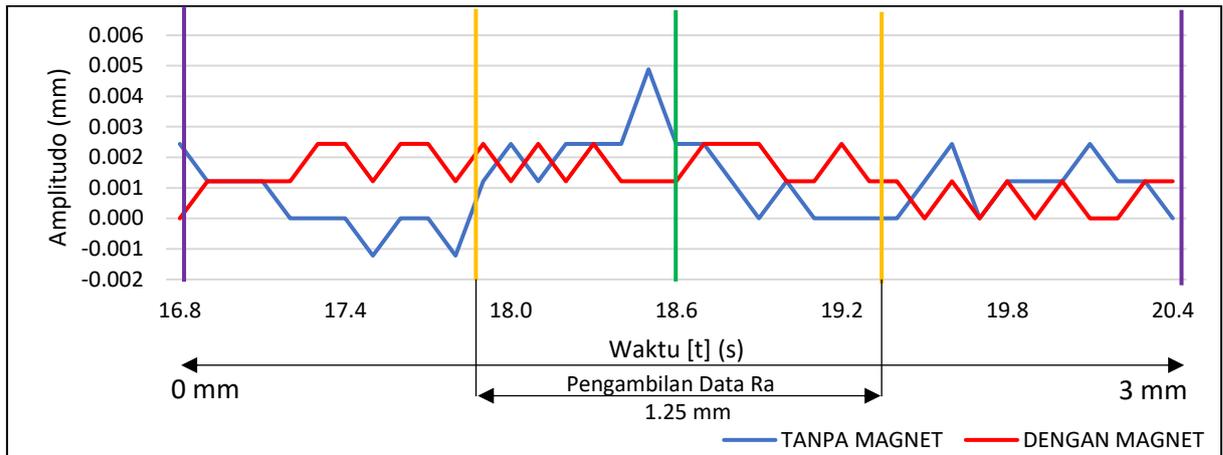
Hal ini memenuhi Persamaan 2-4 dan 2-5 yang menjelaskan hubungan antara Ra dengan *spindle speed* yang berbanding terbalik. *Spindle speed* yang rendah akan menghasilkan nilai Ra yang tinggi, begitu juga sebaliknya. Fenomena penurunan nilai kekasaran ini juga didukung oleh persamaan lainnya yaitu Persamaan 2-3 dimana nilai *material removal rate* dipengaruhi oleh *feed rate* yang terbentuk atas hasil kali nilai *feed per tooth*, jumlah sudu pahat, dan *spindle speed*. Semakin tinggi *spindle speed* artinya putaran yang dilakukan oleh pahat saat proses permesinan lebih banyak sehingga *chip*/geram hasil pemakanan makin cepat terbentuk memudahkan mata pahat selanjutnya dalam melakukan pemakanan.

Sesuai dengan apa yang sudah dijabarkan pada tinjauan pustaka, medan magnet yang dalam konteks ini berfungsi sebagai peredam getaran berperan penting dalam fenomena penurunan nilai kekasaran suatu permukaan. Hal ini dikarenakan gaya tolak menolak (*repulsive force*) yang berasal dari magnet permanen identik dipasang di samping kiri dan kanan pahat menghasilkan induksi magnetik yang mengalir di sekitar pahat potong memaksa pahat tersebut tetap berada di titik keseimbangannya. Posisi pahat yang setimbang menyebabkan pahat tidak menerima beban yang terlalu besar ketika melakukan kontak dengan *workpiece* sehingga *cutting force* dapat diminimalisasi yang berujung pada menurunnya nilai kekasaran permukaan.

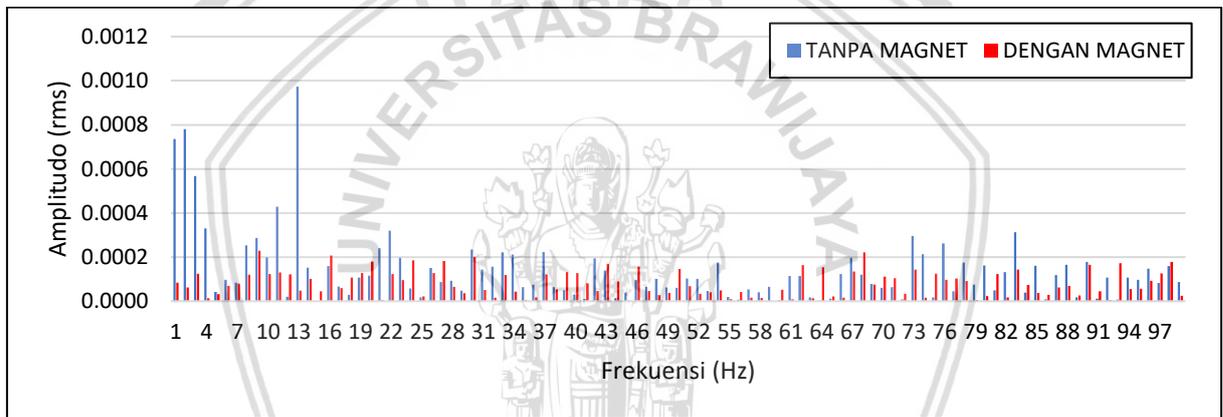
4.4.2 Grafik dan Pembahasan Amplitudo pada proses *Slot Milling* tanpa dan dengan Medan Magnet

Selama proses pemakanan pada benda kerja, dilakukan juga pengambilan data Amplitudo dengan bantuan *software* National Instruments LabView MyRio 2013. Tujuan dari pengambilan data Amplitudo ini adalah untuk mengetahui secara khusus fenomena *chatter* yang terjadi selama proses pemakanan serta peran dari medan magnet dalam mengurangi *chatter* dikarenakan *chatter* berpengaruh terhadap nilai kekasaran permukaan.

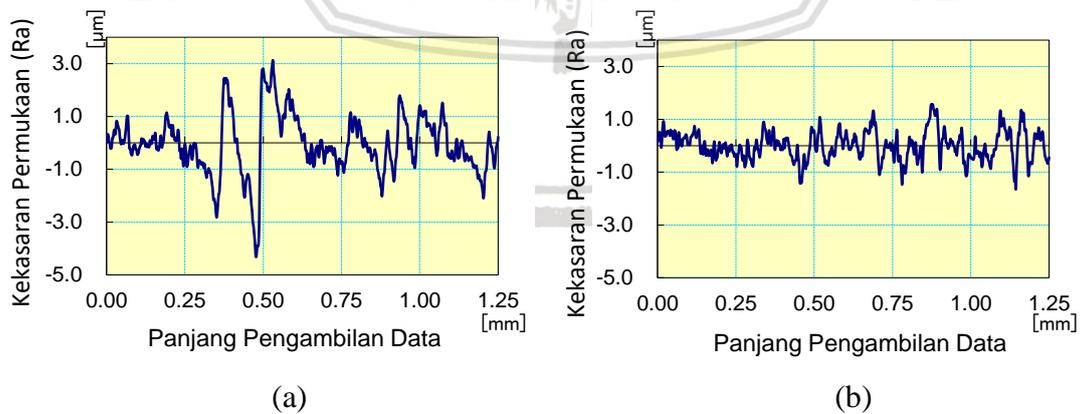
4.4.2.1 Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2400 rpm



Gambar 4.2 Data Amplitudo pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2400 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet



Gambar 4.3 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2400 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 18,6$ detik



Gambar 4.4 Data Kekasaran Permukaan Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2400 rpm tanpa (a) dan dengan (b) Medan Magnet

Penelitian untuk proses pemakanan dengan *spindle speed* 2400 rpm menghasilkan grafik yang terdapat pada Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4. Gambar 4.2 menjelaskan nilai Amplitudo pada selang waktu permesinan $t = 16,8 - 20,4$ detik. Pada $t = 18,6$ detik diambil sampel data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.3 serta pengujian kekasaran permukaan seperti yang tertera pada Gambar 4.4.

Selama operasi permesinan, terjadi dua macam getaran, yaitu resonansi dan *regenerative chatter*. Melalui percobaan *dry run* kita dapat mengetahui nilai frekuensi natural dari *spindle* yaitu sebesar 1 Hz, dan jika dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya didapat nilai yang tidak bulat sehingga fenomena getaran yang terjadi pada segmen ini yaitu segmen 5 ($16,8 \leq t \leq 20,4$) adalah *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* dapat terjadi akibat adanya ketidakstabilan pahat potong ketika melakukan proses permesinan. Salah satu faktor yang menyebabkan ketidakstabilan pahat untuk tetap berada di titik seimbangnya adalah *cutting force*. *Cutting force* yang fluktuatif mempengaruhi besarnya nilai Amplitudo.

Dapat dilihat pada Gambar 4.2 yaitu proses *slot milling* dengan parameter *spindle speed* 2400 rpm, proses pemakanan tanpa medan magnet menghasilkan nilai Amplitudo cenderung tidak beraturan dibandingkan dengan proses pemakanan dengan medan magnet. Hal ini ditunjukkan pada segmen 5, nilai *root mean square* (rms) Amplitudo pemakanan tanpa medan magnet sebesar 0,0017 mm dan dengan medan magnet sebesar 0,0016 mm.

Berdasarkan Gambar 4.3, fenomena *regenerative chatter* pada nilai Amplitudo tertinggi pada grafik, yaitu pada frekuensi 13 Hz diketahui melalui proses pemakanan tanpa medan magnet. Proses pemakanan dengan medan magnet menghasilkan Amplitudo yang lebih rendah pada setiap frekuensinya. Sesuai dengan penjelasan pada Persamaan 2-9 dan 2-10, *repulsive force* dari magnet permanen yang berperan dalam meredam getaran dapat menjaga pahat potong untuk berada pada titik keseimbangannya sehingga fenomena *regenerative chatter* dapat diminimalisasi. Teredamnya getaran diikuti dengan penekanan fenomena *regenerative chatter* menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah pada segmen yang sama dengan nilai kekasaran rata-rata (R_a) tanpa dan dengan medan magnet secara berturut-turut sebesar $0,819 \mu\text{m}$ dan $0,432 \mu\text{m}$ dengan presentase reduksi sebesar 47,253%. Hasil pada sampel lainnya dapat dilihat di Tabel 4.9 dan 4.10 berikut.

Tabel 4.9

Rentang Waktu Pengambilan Data Amplitudo dan Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2400 rpm

Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0024	0,643
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0018	0,415
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0016	0,624
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0016	0,764
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0017	0,819
Rata-rata		0,0019	0,587

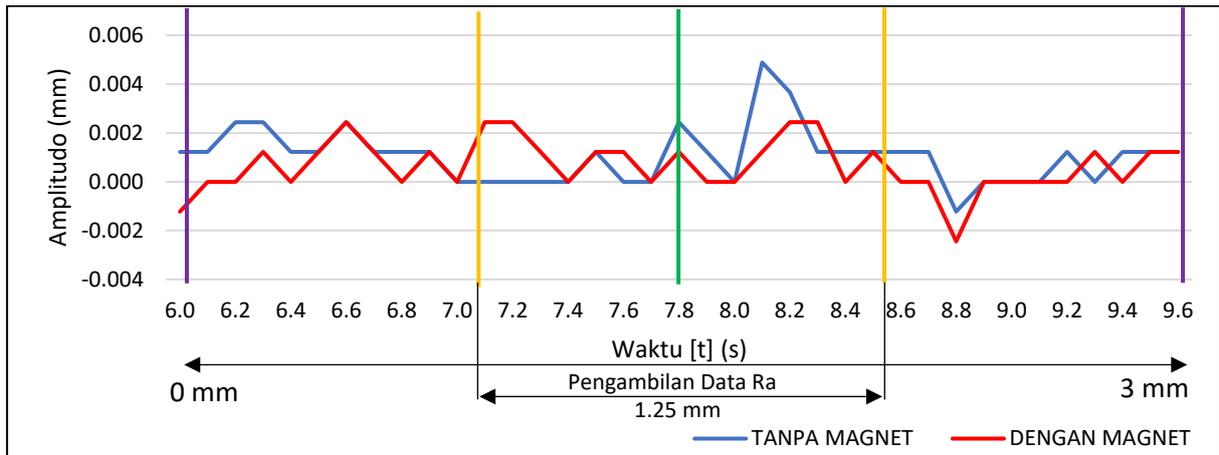
Tabel 4.10

Rentang Waktu Pengambilan Data Amplitudo dan Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2400 rpm

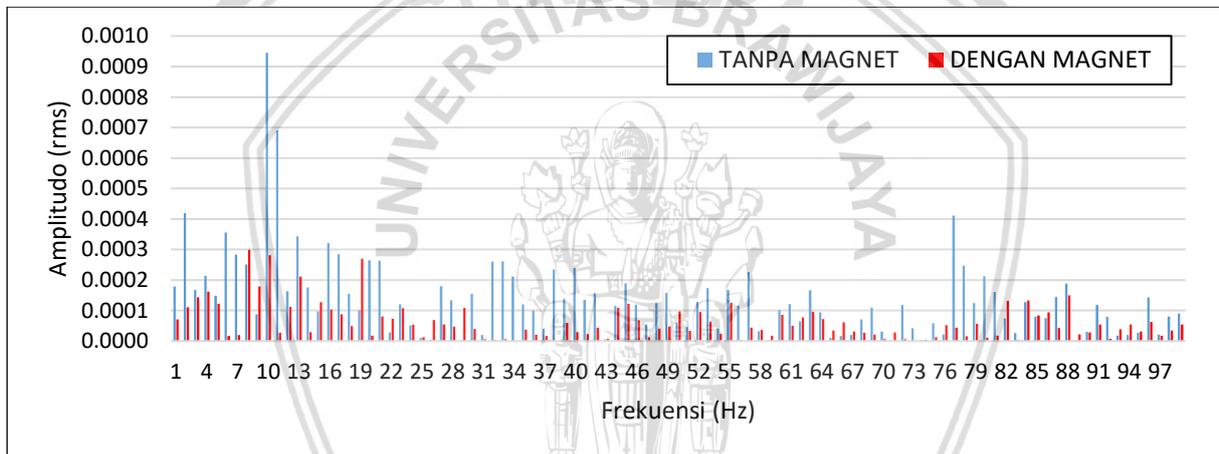
Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0015	0,432
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0012	0,542
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0017	0,412
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0014	0,432
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0016	0,432
Rata-rata		0,0015	0,450

Berdasarkan Tabel 4.9 dan 4.10, maka dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian medan magnet pada proses *slot milling* dengan *spindle speed* sebesar 2400 rpm menghasilkan reduksi nilai rms Amplitudo dan kekasaran permukaan yang cukup signifikan.

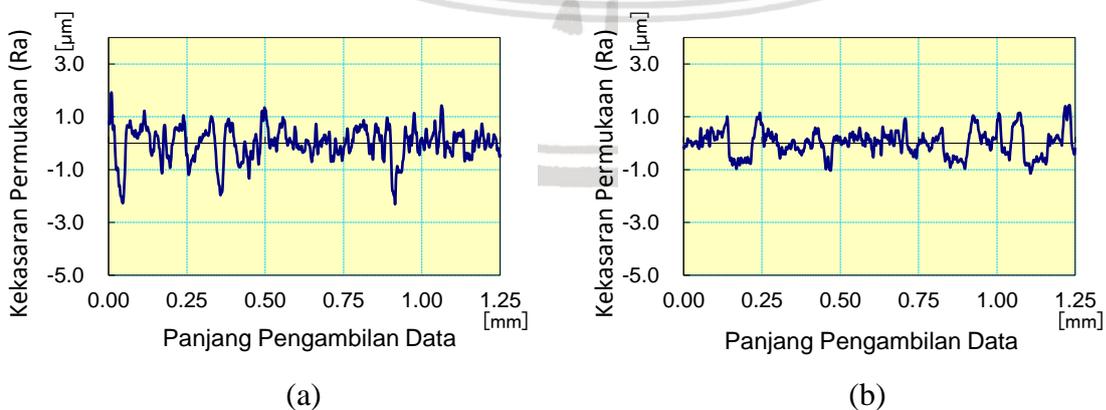
4.4.2.2 Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2600 rpm



Gambar 4.5 Data Amplitudo pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet



Gambar 4.6 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 7,8$ detik



Gambar 4.7 Data Kekasaran Permukaan Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2600 rpm tanpa (a) dan dengan (b) Pengaplikasian Medan Magnet

Penelitian untuk proses pemakanan dengan *spindle speed* 2600 rpm menghasilkan grafik yang terdapat pada Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7. Gambar 4.5 menjelaskan nilai Amplitudo pada selang waktu permesinan $t = 6 - 9,6$ detik. Pada $t = 7,8$ detik diambil sampel data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.6 serta pengujian kekasaran permukaan seperti yang tertera pada Gambar 4.7.

Selama operasi permesinan, terjadi dua macam getaran, yaitu resonansi dan *regenerative chatter*. Melalui percobaan *dry run* kita dapat mengetahui nilai frekuensi natural dari *spindle* yaitu sebesar 3 Hz, dan jika dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya didapat nilai yang tidak bulat sehingga fenomena getaran yang terjadi pada segmen ini yaitu segmen 2 ($6,0 \leq t \leq 9,6$) adalah *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* dapat terjadi akibat adanya ketidakstabilan pahat potong ketika melakukan proses permesinan. Salah satu faktor yang menyebabkan ketidakstabilan pahat untuk tetap berada di titik seimbangnya adalah *cutting force*. *Cutting force* yang fluktuatif mempengaruhi besarnya nilai Amplitudo.

Dapat dilihat pada Gambar 4.5 yaitu proses *slot milling* dengan parameter *spindle speed* 2600 rpm, proses pemakanan tanpa medan magnet menghasilkan nilai Amplitudo cenderung tidak beraturan dibandingkan dengan proses pemakanan dengan medan magnet. Hal ini ditunjukkan pada segmen 2 nilai *root mean square* (rms) Amplitudo pemakanan tanpa medan magnet sebesar 0,0016 mm dan dengan medan magnet sebesar 0,0012 mm.

Berdasarkan Gambar 4.6, fenomena *regenerative chatter* pada nilai Amplitudo tertinggi pada grafik, yaitu pada frekuensi 10 Hz diketahui melalui proses pemakanan tanpa medan magnet. proses pemakanan dengan medan magnet menghasilkan Amplitudo yang lebih rendah pada setiap frekuensinya. Sesuai dengan penjelasan pada Persamaan 2-9 dan 2-10, *repulsive force* dari magnet permanen yang berperan dalam meredam getaran dapat menjaga pahat potong untuk berada pada titik keseimbangannya sehingga fenomena *regenerative chatter* dapat diminimalisasi. Teredamnya getaran diikuti dengan penekanan fenomena *regenerative chatter* menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah pada segmen yang sama dengan nilai kekasaran rata-rata (R_a) tanpa dan dengan medan magnet secara berturut-berturut sebesar 0,496 μm dan 0,341 μm dengan presentase reduksi sebesar 37.182%. Hasil pada sampel lainnya dapat dilihat di Tabel 4.11 dan 4.12 berikut.

Tabel 4.11

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitudo*, dan Kekasaran Permukaan (R_a) tanpa Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2600 rpm

Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0018	0,564
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0016	0,496
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0015	0,489
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0017	0,446
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0017	0,731
Rata-rata		0,0016	0,545

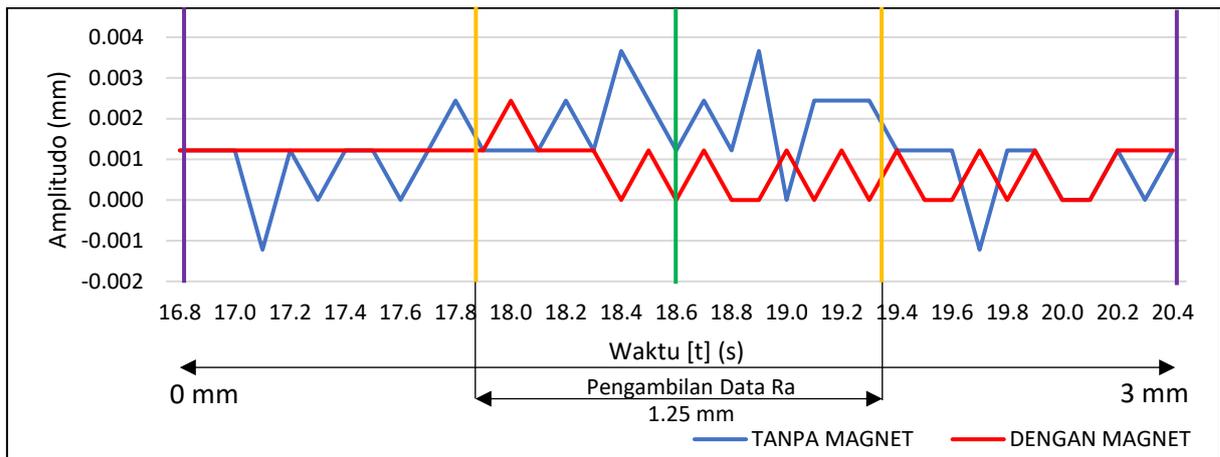
Tabel 4.12

Rentang Waktu Pengambilan Data *Amplitudo*, dan Kekasaran Permukaan (R_a) dengan Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2600 rpm

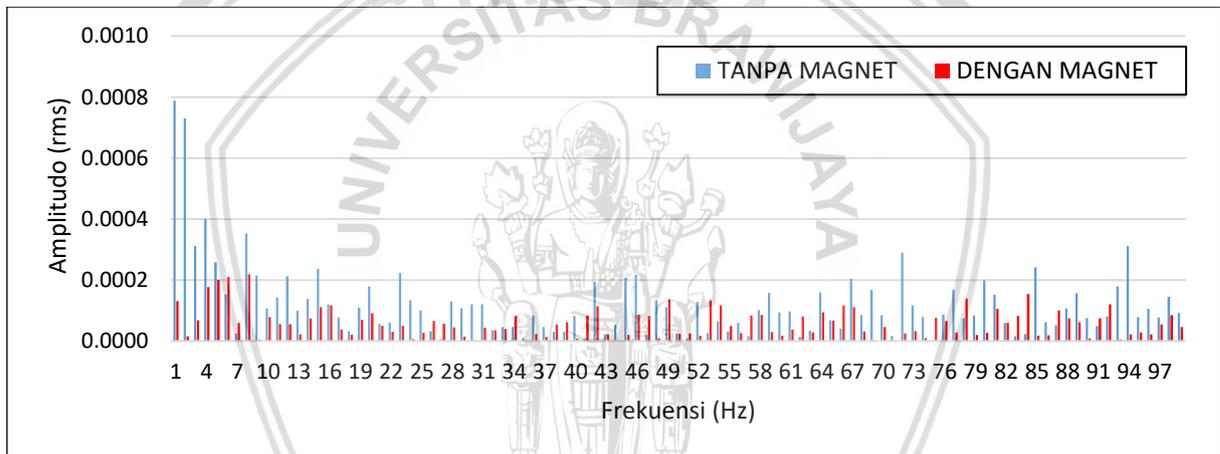
Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0015	0,391
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0012	0,341
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0012	0,391
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0014	0,373
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0016	0,381
Rata-rata		0,0014	0,375

Berdasarkan tabel 4.11 dan 4.12, maka dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian medan magnet pada proses *Slot Milling* dengan *spindle speed* sebesar 2600 rpm menghasilkan reduksi nilai rms Amplitudo dan kekasaran permukaan yang cukup signifikan.

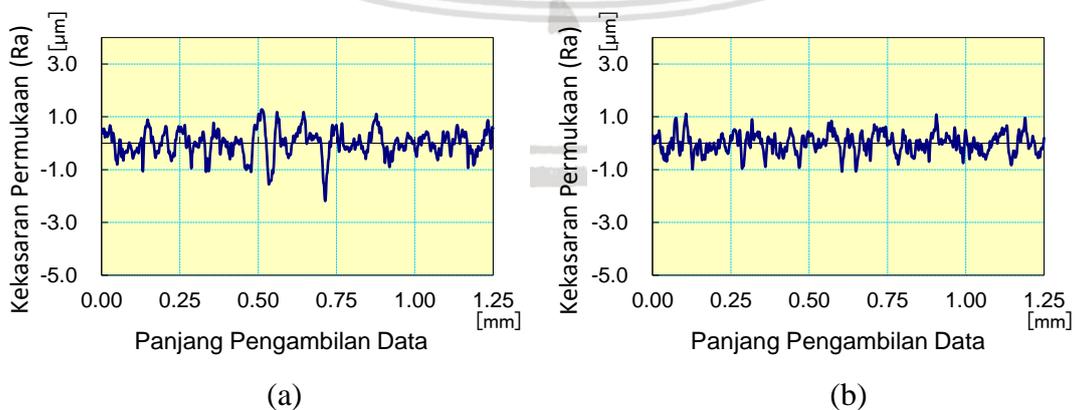
4.4.2.3 Proses Pemakanan dengan *Spindle Speed* 2800 rpm



Gambar 4.8 Data Amplitudo pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2800 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet



Gambar 4.9 Data *Spectrum Frequency* pada Proses *Slot Milling* dengan *Spindle Speed* 2800 rpm tanpa dan dengan Medan Magnet pada $t = 18,6$ detik



Gambar 4.10 Data Kekasaran Permukaan dengan *Spindle Speed* 2800 rpm pada Proses *Slot Milling* tanpa (a) dan dengan (b) Medan Magnet

Penelitian untuk proses pemakanan dengan *spindle speed* 2600 rpm menghasilkan grafik yang terdapat pada Gambar 4.8, Gambar 4.9, dan Gambar 4.10. Gambar 4.8 menjelaskan nilai Amplitudo pada selang waktu permesinan $t = 16,8 - 20,4$ detik. Pada $t = 18,6$ detik diambil sampel data *spectrum frequency* yang dihasilkan pada kedua proses permesinan sesuai pada Gambar 4.9 serta pengujian kekasaran permukaan seperti yang tertera pada Gambar 4.10.

Selama operasi permesinan, terjadi dua macam getaran, yaitu resonansi dan *regenerative chatter*. Melalui percobaan *dry run* kita dapat mengetahui nilai frekuensi natural dari *spindle* yaitu 1 Hz, dan jika dibandingkan dengan frekuensi eksitasinya didapat nilai yang tidak bulat sehingga fenomena getaran yang terjadi pada segmen ini yaitu segmen 5 ($16,8 \leq t \leq 20,4$) adalah *regenerative chatter*. Fenomena *regenerative chatter* dapat terjadi akibat adanya ketidakstabilan pahat potong ketika melakukan proses permesinan. Salah satu faktor yang menyebabkan ketidakstabilan pahat untuk tetap berada di titik seimbangannya adalah *cutting force*. *Cutting force* yang fluktuatif mempengaruhi besarnya nilai Amplitudo.

Dapat dilihat pada Gambar 4.8 yaitu proses *slot milling* dengan parameter *spindle speed* 2800 rpm, proses pemakanan tanpa medan magnet menghasilkan nilai Amplitudo cenderung tidak beraturan dibandingkan dengan proses pemakanan dengan medan magnet. Hal ini ditunjukkan pada segmen 5, nilai *root mean square* (rms) Amplitudo pemakanan tanpa medan magnet sebesar 0,0017 mm dan dengan medan magnet sebesar 0,0011 mm.

Berdasarkan Gambar 4.9, fenomena *regenerative chatter* pada nilai Amplitudo tertinggi pada grafik, yaitu pada frekuensi 1 Hz diketahui melalui proses pemakanan tanpa medan magnet. Proses pemakanan dengan medan magnet menghasilkan Amplitudo yang lebih rendah pada setiap frekuensinya. Sesuai dengan penjelasan pada Persamaan 2-9 dan 2-10, *repulsive force* dari magnet permanen yang berperan dalam meredam getaran dapat menjaga pahat potong untuk berada pada titik keseimbangannya sehingga fenomena *regenerative chatter* dapat diminimalisasi. Teredamnya getaran diikuti dengan penekanan fenomena *regenerative chatter* menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih rendah pada segmen yang sama dengan nilai kekasaran rata-rata (R_a) tanpa dan dengan medan magnet secara berturut-turut sebesar $0,384 \mu\text{m}$ dan $0,304 \mu\text{m}$ dengan presentase reduksi sebesar 23,432%. Hasil pada sampel lainnya dapat dilihat di Tabel 4.13 dan 4.14 berikut.

Tabel 4.13

Rentang Waktu Pengambilan Data Amplitudo, dan Kekasaran Permukaan (Ra) tanpa Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2800 rpm

Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0017	0,511
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0013	0,445
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0016	0,333
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0013	0,386
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0017	0,384
Rata-rata		0,0015	0,412

Tabel 4.14

Rentang Waktu Pengambilan Data Amplitudo, dan Kekasaran Permukaan (Ra) dengan Medan Magnet dengan *Spindle Speed* 2800 rpm

Segmen	Selang Waktu (menit : detik)	Amplitudo (rms)	Kekasaran Permukaan (μm)
Segmen 1	00:02,4 - 00:06,0	0,0010	0,321
Segmen 2	00:06,0 - 00:09,6	0,0012	0,323
Segmen 3	00:09,6 - 00:13,2	0,0011	0,353
Segmen 4	00:13,2 - 00:16,8	0,0013	0,358
Segmen 5	00:16,8 - 00:20,4	0,0011	0,304
Rata-rata		0,0011	0,332

Berdasarkan Tabel 4.13 dan 4.14, maka dapat disimpulkan bahwa pengaplikasian medan magnet pada proses *slot milling* dengan *spindle speed* sebesar 2800 rpm menghasilkan reduksi nilai rms Amplitudo dan kekasaran permukaan yang cukup signifikan.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, penulis dapat menyimpulkan bahwa:

1. Pada proses *slot-milling*, besarnya nilai *spindle speed* memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan (R_a) dari aluminium. Nilai kekasaran permukaan (R_a) semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*, dibuktikan dari permukaan hasil uji kekasaran yang lebih halus dengan *spindle speed* yang semakin cepat. Sesuai dengan persamaan non-linear yang didapat yaitu:
 - a. Proses tanpa pengaplikasian medan magnet
$$R_a = N^{-2,881} \cdot 35419557234$$
 - b. Proses dengan pengaplikasian medan magnet
$$R_a = N^{-1,961} \cdot 1885173,378$$
2. Meningkatnya nilai *spindle speed* pada proses *slot-milling* dengan pengaplikasian medan magnet memiliki nilai rms amplitudo yang rendah dibandingkan dengan tanpa pengaplikasian medan magnet. Rendahnya nilai rms amplitudo mereduksi fenomena *chatter* berujung pada menurunnya nilai kekasaran permukaan (R_a).

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya, ada baiknya menggunakan variasi jarak antara magnet dengan pahat potong supaya dapat mengetahui besarnya kekuatan magnet dalam mereduksi fenomena *chatter*.
2. Sebaiknya pada penelitian berikutnya juga terdapat variasi *tool overhang* untuk proses pemakanan tanpa dan dengan pengaplikasian medan magnet.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M.Y., Mohamed A.R., Asfana B., Lutfi M., Fahmi, I.M. (2012). *Investigation of Vibration and Surface Roughness in Micro Milling of PMMA*. Malaysia: Department of Manufacturing and Materials Engineering, International Islamic University Malaysia.
- Altintas, Yusuf. (2012). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design 2nd Edition*. United States of America: Cambridge.
- Benoit, Kenneth. (2011). *Linear Regression Models with Logarithmic Transformations*. London: Methodology Institute, London School of Economics.
- Bolsunovsky, S., Vermel V., Gubanov, G. (2013). *Cutting Force Calculation and Experimental Measurement for 5-axis Ball End Milling*. Moscow: Central Aerodynamics Institute (TsAGI) Russia.
- Boothroyd, Geoffrey (1989). *Fundamentals of Machining and Machine Tools: Second Edition*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Coe, J.M.D. (2009). *Magnetism and Magnetic Material*. New York: Cambridge University Press.
- Cullity, B. D., & Graham, C. D., (2009). *Introduction to Magnetic Material*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Davim, Paulo J. (2011). *Modern Machining Technology*. Cambridge: Woodhead Publishing in Mechanical Engineering.
- Dehong, Huo, Chao, Lin, Zi, Jie Choong, Pancholi, Ketan, Degenaar, Patrick. (2015). *Surface and Subsurface Characterisation in Micro-milling of Monocrystalline Silicon*. London: Springer-Verlag.
- El-Hofy, Hassan. (2014). *Fundamentals of Machining Process: Conventional and Non-Conventional Process*. London: CRC Press.
- Groover, Mikell P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: 4th Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Kalinski, Krzysztof J., Galewski, Marek. (2015). *Optimal Spindle Speed Determination for Vibration Reduction during Ball-end Milling of Flexible Details*. Gdansk: Faculty of Mechanical Engineering, Gdansk University of Technology.
- Kalpakjian, Serope & Schmid, Steven R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology: 6th Edition*. New York: Prentice Hall.
- Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Micromill Operator Manual*.

- Nandi, P., Neogy, S., Badhuri, S., Irretier, H. (2011). *Vibration Attenuation by a Combination of a Piezoelectric Stack and a Permanent Magnet*. Kolkata: IOS Press.
- Paul, Sam, Varadarajan A.S., Vasanth, X. Ajay, Lawrance, G. (2013). *Effect of Magnetic Field on Damping Ability of Magnetorheological Damper during Hard Turning*. New York: Elsevier Urban & Partner Sp.
- Qehaja, Nexhat, Jakupi, K., Bunjaku, A., Bruçi, M., Osmani, H. (2015). *Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process*. Kosovo: University of Pristina.
- Rao, Siringesu S. (2011). *Mechanical Vibration: Fifth Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Rattat, Christian. (2017). *CNC Milling for Makers: Basics, Techniques, Applications*. Paderborn: Dpunkt Verlag.
- Rochim, T. (2001). *Spesifikasi, Metrologi, & Kontrol Kualitas Geometrik, Proses Permesinan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sahin, Yusuf, Motorcu, A. Riza. (2004). *Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PCD Coated Cutting Tools*. Ankara: Gazi University.
- Singh, Rachna. (2017). *Microelectromechanical systems (MEMS) Market by Type (Sensor and Actuator) and Industry Vertical (Consumer Electronics, Automotive, Industrial, Aerospace & Defense, Healthcare, and Telecommunication) - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014-2022*. Pune: Allied Market Research.
- Sulaiman, Syaidatul A., Amin, Nurul A.K.M., Arif, M. D., (2012). *Application of Permanent Magnets for Chatter Control in End Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V*. Malaysia: Department of Manufacturing and Materials Engineering, International Islamic University Malaysia.
- Wu, Tao; Cheng, Kai. (2013). *Micro Cutting: Fundamentals and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.