PENGARUH *SPINDLE SPEED FACE MILLING* TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN DAN LAJU KOROSI PADA SS316L DENGAN METODE *LOW TEMPERATUR MACHINING*

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

ADITYA WIRA WIGUNA

NIM. 165060201111049

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2021

repository.ub.ac.id

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH *SPINDLE SPEED FACE MILLING* TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN DAN LAJU KOROSI PADA SS316L DENGAN METODE *LOWTEMPERATUR MACHINING*

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

ADITYA WIRA WIGUNA

NIM. 165060201111049

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh Dosen Pembimbing
pada tanggal 9 Juni 2021

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Rudianto Raharjo, ST., MT.	**Teguh Widodo, ST., M.Eng., Ph.D.**
NIP. 19820225 201212 1 002	**NIP. 2014118411231001**

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1

Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

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, 9 Juni 2021

Mahasiswa,

Aditya Wira Wiguna

NIM. 165060201111049

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

TURNITIN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : **613/UN10.F07.12.11/PP/2021**

Sertifikat ini diberikan kepada :

ADITYA WIRA WIGUNA

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH SPINDLE SPEED FACE MILLING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN DAN LAJU KOROSI PADA SS316L DENGAN METODE LOW TEMPERATUR MACHINING

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi ≤ 20 %, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal

Malang, 11 Juni 2021

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Prof. DJAROT B. DARMADI, Ir.,MT.,Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

MEGA NUR SASONGKO, ST.,MT.,Dr.Eng
NIP. 19740930 200012 1 001

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* Terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Korosi Pada SS316L Dengan Metode *Low Temperatur Machining*

Nama Mahasiswa : Aditya Wira Wiguna

NIM : 165060201111049

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING

Dosen Pembimbing 1 : Rudianto Raharjo, ST., MT.

Dosen Pembimbing 2 : Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Wahyono Suprapto, MT.Met.

Dosen Penguji 2 : Ir. Erwin Sulistyo, MT.

Dosen Penguji 3 : Nafisah Arina Hidayati, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 10 Mei 2021

SK Penguji : 749/UN10.F07/SK/2021

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR LAMPIRAN xiii
RINGKASAN xvv
SUMMARY xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 4
1.5 Manfaat Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Penelitian Sebelumnya 5
2.2 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*) 7
2.2.1 Klasifikasi Stainless Steel 8
2.2.2 Baja tahan karat AISI 316L 10
2.3 Proses Manufaktur 11
2.4 Proses Permesinan (*Machining*) 12
2.5 Gaya yang Bekerja pada Proses Pemesinan 13
2.6 Konduksi dalam Konduktivitas Termal 13
2.7 Proses *Milling* 14
2.7.1 Proses *Up Milling* dan *Down Milling* 16
2.7.2 Parameter Permesinan pada Proses *End Milling* 17
2.7.3 *Vertical Machining Centers* (VMC) 19
2.8 *End Mill Cutter* 20
2.9 Korosi 21
2.9.1 Definisi 21
2.9.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi 24
2.9.3 Jenis-Jenis Korosi 25
2.9.4 Pencegahan 26

2.10 Laju Korosi 27
2.10.1 Pengujian Laju Korosi 27
2.10.2 Korosi dalam Tubuh Manusia 30
2.11 *Surface Roughness* 30
2.12 *Low Temperature Machining* 34
2.13 Hipotesis 34
BAB III METODE PENELITIAN 35
3.1 Metode Penelitian 35
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian 35
3.3 Variabel Penelitian 35
3.3.1 Variabel bebas 35
3.3.2 Variabel terikat 36
3.3.3 Variabel Terkontrol 36
3.4 Alat dan Bahan Penelitian 36
3.5 Dimensi benda 44
3.6 Prosedur Penelitian 44
3.7 Prosedur Pengujian Spesimen 45
3.8 Skema Penelitian 46
3.9 Diagram Alir 47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 49
4.1 Data Hasil Pengujian 49
4.1.1 Data Hasil Pengujian Material *Stainless Steel* 316L 49
4.2 Data Hasil Pengolahan Grafik Kekasaran Permukaan dan Laju Korosi 52
4.2.1 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan (Ra) Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining* 52
4.2.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan (Ra) Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining* 52
4.2.3 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Rata − Rata Kekasaran Permukaan (Ra) pada Setiap Perlakuan Spesimen 54
4.2.4 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Rata − Rata Kekasaran Permukaan (Ra) pada Setiap Perlakuan Spesimen 54

4.2.5 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining* 55
4.2.6 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining* 56
4.2.7 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi pada Setiap Perlakuan Spesimen 57
4.2.8 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi pada Setiap Perlakuan Spesimen 57
4.3 Data Hasil Pengolahan Grafik Pengaruh *Spindle Speed* Terhadap Temperatur Dan Waktu 58
4.3.1 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* Terhadap Temperatur Dan Waktu Pemakanan Pada Stainless Steel 316L 58
4.3.1 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Temperatur dan Waktu Pada Stainless Steel 316L 58
4.4 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Dari Pengujian Laju Korosi.....
4.4.1 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Laju Korosi Setiap Perlakuan Dengan Variasi *Spindle Speed* 60
4.4.2 Analisis Grafik Polarisasi Laju Korosi Pada Setiap Perlakuan Dengan Variasi *Spindle Speed* 61
4.5 Data Hasil Pengujian Foto Mikrostruktur 62
4.5.1 Gambar Hasil Foto Mikrostruktur Pada Spesimen Dengan Variabel *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry* 62
4.5.2 Analisis Hasil Foto Mikrostruktur Pada Spesimen Dengan Variabel *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry* 62
4.6 Data Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope* 63
4.6.1 Gambar Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope* 63
4.6.2 Analisis Gambar Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope* 65
BAB V PENUTUP 67
5.1 Kesimpulan 67
5.2 Saran 67
DAFTAR PUSTAKA 69
LAMPIRAN 73

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat Fisik *Stainless Steel* 7
Tabel 2.2 Sifat Mekanik *Stainless Steel* 11
Tabel 2.3 Unsur AISI 316L *Stainless Steel* 11
Tabel 2.4 Standar elektroda potensial 23
Tabel 2.5 Laju Korosi 27
Tabel 2.6 Komposisi Kimia HBSS 30
Tabel 2.7 Angka kekasaran dan Panjang Sampel Standar 32
Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin HAAS VF2 37
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan *Stainless Steel*316L 49
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Laju Korosi pada *Stainless Steel* 316L 50
Tabel 4.3 Perhitungan Temperatur Terhadap Waktu Pada *Stainless Steel* 316L 50

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan *Spindle Speed* dan *Feed Rate* dengan *Surface Roughness* 5
Gambar 2.2 Perbandingan *Cryogenic Process* dan *Dry Process* dengan *Cutting Speed* .. 6
Gambar 2.3 (a) *Cryogenic Process* dan (b) *Dry process* 6
Gambar 2.4 Pendefinisian Manufaktur 12
Gambar 2.5 *Proses* machining 12
Gambar 2.6 Gaya-gaya pada Proses Pemesinan; (a) Gaya yang Bekerja pada Pemotongan Orthogonal, (b) Gaya yang Bekerja pada Pahat yang Dapat Diukur Oleh Alat Ukur 13
Gambar 2.7 Proses Konduksi 14
Gambar 2.8 *Peripheral milling* 15
Gambar 2.9 *Face milling* 15
Gambar 2.10 Proses *End Milling* 16
Gambar 2.11 Proses *Up Milling* dan *Down Milling* 17
Gambar 2.12 *Axial Depth of Cut* (a_e) dan *Radial Depth of Cut* (a_p) 18
Gambar 2.13 Mesin *Vertical Machining Center* HAAS VF 2 19
Gambar 2.14 Sistem Persumbuan Pada *Mesin Milling* 19
Gambar 2.15 *Solid Carbide end Mills* (a) *Short Series*, (b) *Long Series* 20
Gambar 2.16 *End Mill Cutter* dengan Dua *Flute* 20
Gambar 2.17 *End Mill Cutter* dengan *Flute* Lebih Dari Dua 21
Gambar 2.18 *Ball End Mill Cutter* 21
Gambar 2.19 Proses Korosi 22
Gambar 2.20 Korosi Seragam 25
Gambar 2.21 Korosi Galvanis 25
Gambar 2.22 Korosi Celah 26
Gambar 2.23 Korosi Sumuran 26
Gambar 2.24 Kurva Potensial Anodik Katodik 28
Gambar 2.25 Profil Kekasaran Permukaan 31
Gambar 3.1 Mesin CNC Haas VF-2 VMC (*Vertical Machining Center*) 36
Gambar 3.2 *Surface Roughness Tester* SJ-301 37
Gambar 3.3 *Carbide Square End Mill* Diameter 6 mm 38
Gambar 3.4 *Thermogun* 39
Gambar 3.5 *Potentiosat/Galvanostat Instrument* 40

Gambar 3.6 Kondisi Batas yang Digunakan dalam Pengujian.....41
Gambar 3.7 Grafik Polarisasi Korosi 41
Gambar 3.8 Grafik Polariasi Korosi dengan Tabel 42
Gambar 3.9 Contoh dari Hasil Pembacaan Data dari Uji Korosi.....42
Gambar 3.10 *Stainless Steel* AISI 316L 42
Gambar 3.11 Larutan HCl 43
Gambar 3.12 *Aluminium Hollow*.....43
Gambar 3.13 *Dry Ice* 44
Gambar 3.14 Dimensi Spesimen AISI *Stainless Steel* 316L.....44
Gambar 3.15 Skema Penelitian 46
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan Spesimen (Ra) dengan Metode *Low Temperature Machining*..52
Gambar 4.2 Ilustrasi Proses *Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan 53
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh *Spindle speed Face Milling* terhadap Rata-Rata Kekasaran Permukaan (Ra) Setiap Perlakuan Spesimen.....54
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining* 56
Gambar 4.5 Grafik Pengaruh *Spindle Speed* terhadap Laju Korosi setiap Perlakuan Spesimen.....57
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* Terhadap Temperatur Dan Waktu Pada *Stainless Steel* 316L 58
Gambar 4.7 Grafik Polarisasi Laju Korosi Variasi *Spindle Speed* dengan Metode *Low* Temperatur.....60
Gambar 4.8 Grafik Polarisasi Laju Korosi Variasi *Spindle Speed* dengan Metode *Dry*..60
Gambar 4.9 Hasil Uji Foto Mikrostruktur dengan Variasi *Spindle Speed* Menggunakan *metode low temperatur* (a) 1000 RPM (b) 1500 RPM dan (C) 2000 RPM..62
Gambar 4.10 Hasil Uji Foto Mikrostruktur dengan Variasi *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Dry* (a) 1000 RPM (b) 1500 RPM dan (C) 2000 RPM 62
Gambar 4.11 Hasil uji foto *scanning electron microscope* variasi *spindle speed* menggunakan metode *low temperatur*e dan metode *dry* dengan perbesaran 1000x sebelum korosi.....63
Gambar 4.12 Hasil Uji Foto *Scanning Electron Microscope* Variasi *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry* dengan Perbesaran 1000x Sesudah Korosi.....64

Gambar 4.13 Hasil Uji Foto *Scanning Electron Microscope* Variasi *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry* dengan Perbesaran 5000x Sebelum Korosi..... 64
Gambar 4.14 Hasil Uji Foto *Scanning Electron Microscope* Variasi *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry* Dengan Perbesaran 5000x Sesudah Korosi..... 64

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 *Datasheet Standard Milling Condition* untuk Pahat NACHI 73

Lampiran 2 *Datasheet* Komposisi Material *Stainless Steel* 316L 74

Lampiran 3 *Datasheet Dry Ice* / Solid CO_2 75

Lampiran 4 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM dengan Perlakuan 76

Lampiran 5 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan 77

Lampiran 6 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM dengan Perlakuan 78

Lampiran 7 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan 79

Lampiran 8 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM dengan Perlakuan 80

Lampiran 9 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan 81

Lampiran 10 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM dengan Perlakuan 82

Lampiran 11 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan 83

Lampiran 12 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM dengan Perlakuan 84

Lampiran 13 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan 85

Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Aditya Wira Wiguna, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2021, Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Korosi pada SS316L dengan Metode *Low Temperature Machining*, Dosen Pembimbing: Rudianto Raharjo, ST., MT., dan Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D.

Stainless steel adalah material yang mengandung senyawa besi dan setidaknya 12% Kromium untuk mencegah proses korosi (pengaratan logam). Kemampuan tahan karat diperoleh dari terbentuknya lapisan film oksida Kromium yang menghalangi proses oksidasi besi (Ferum). Kelebihan AISI 316L *stainless steel* adalah sangat sering digunakan pada dunia alat-alat bedah operasi karena memiliki ketahanan korosi yang paling tinggi dan sangat cocok untuk bahan implan. Kekerasan permukaan dari suatu bahan implan menentukan stabilitas hubungan tulang dan implan, kestabilan ditemukan pada implan dengan ditandai pembentukan jaringan tulang sehingga tercipta ikatan kuat antara implan dan jaringan tulang. Suhu yang sangat rendah dalam pemesinan dapat meningkatkan sifat mekanik suatu logam jika dibandingkan dengan pemesinan pada suhu ruang. Hal tersebut juga dapat menghasilkan peningkatan kekerasan dan ketangguhan pada pahat yang dapat menyebabkan tingkat pemotongan yang lebih tinggi, konsumsi energi yang lebih rendah serta produktivitas yang lebih tinggi.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental menggunakan Mesin CNC *Vertical Machining Center* HAAS VF-2 dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh dari proses *low temperature machining* dalam permesinan *face milling* menggunakan pahat dengan variasi . Menggunakan variasi *spindle speed* sebesar 1000 RPM; 1250 RPM; 1500 RPM; 1750 RPM dan 2000 RPM dan variabel terkontrol dengan *feed rate* 90 mm/menit, *depth of cut* 0,5 rpm, jenis pemakanan *slot milling*, larutan uji korosi HBSS, arah pemakanan pahat lurus dan diameter *end mill* 6 mm. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekasaran permukaan dan laju korosi dengan data pendukung foto mikrostruktur dan uji *Scanning Electron Microscope*.

Hasil yang didapat yaitu variasi *spindle speed* berpengaruh terhadap hasil kekasaran permukaan (Ra) pada permesinan *face milling stainless steel* 316L. Semakin tinggi nilai *spindle speed*, maka nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun. Pada saat *spindle speed* meningkat, terjadi penurunan koefisien gesekan antara permukaan pahat dengan benda kerja. Sehingga yang terjadi koefisien gesek yang rendah dan kualitas dari permukaan akan meningkat. Begitu juga dengan nilai kekasaran permukaan (Ra) berbanding lurus dengan nilai laju korosinya, hal ini bisa terjadi karena kekasaran permukaan yang lebih rendah mempunyai tempat yang sedikit untuk pembentukan korosi pitting, Permukaan kasar akan membuat pembentukan korosi *pitting* dan mampu menjebak ion korosif, sehingga lebih banyak korosi pada permukaan yang terjadi. Metode *low temperature* mempunyai nilai kekasaran yang lebih rendah dan laju korosi yang lebih rendah pula. Dari perhitungan hasil uji mikrostruktur dapat dilihat bahwa menggunakan metode *low temperature* akan menyebababkan ukuran butiran semakin kecil daripada metode *dry*. semakin kecil ukuran butiran maka nilai Icorr akan semakin rendah pula, hal ini menyebabkan laju korosi dengan menggunakan metode *low temperatur*e akan semakin rendah pula.

Kata Kunci: *Low Temperature Machining, Stainless Steel* 316L, Kekasaran Permukaan, Laju Korosi

Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Aditya Wira Wiguna, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, Juni 2021, *Effect of Spindle Speed Face Milling on Surface Roughness and Corrosion Rate on SS316L with Low Temperature Machining Method*, Advisor Lecturer's: Rudianto Raharjo, ST., MT., dan Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D.

Stainless steel is a corrosion-resistant substance that contains iron compounds and at least 12% chromium (rusting metal). The ability to resist corrosion is obtained by forming a sheet of chromium oxide film that prevents iron from oxidizing (Ferum). Since it has the best corrosion resistance and is well suited for implant products, AISI 316L stainless steel is mostly used in the field of surgical surgical instruments. The integrity of the bone and implant relationship is determined by the surface hardness of an implant material, and the stability observed in the implant is defined by the development of bone tissue. so that the implant and the bone tissue form a close bond When machining at very low temperatures, as opposed to machining at room temperature, the mechanical properties of a metal can be improved. Increased tool strength and flexibility will also contribute to higher cutting speeds, reduced energy consumption, and increased efficiency.

With the aim of studying the effect of the low temperature machining process on face milling machining using chisels with variations, this analysis used an experimental approach with the HAAS VF-2 CNC Vertical Machining Core. With a feed rate of 90 mm/minute, depth of cut of 0.5 rpm, slot milling infeed form, HBSS corrosion test solution, straight tool infeed path, and 6 mm end mill diameter and regulated variables with a spindle speed variation of 1000 RPM; 1250 RPM; 1500 RPM; 1750 RPM and 2000 RPM and controlled variables with a feed rate of 90 mm/minute, depth of cut of 0.5 rpm, HBSS corrosion test solution. Surface roughness and corrosion rate were tested, along with supporting evidence for microstructure images and a Scanning Electron Microscope examination.

The spindle speed variance has an impact on the surface roughness (Ra) on 316L stainless steel face milling machining, according to the findings. The lower the surface roughness rating, the higher the spindle rpm. When the spindle speed is increased, the coefficient of friction between the tool's surface and the workpiece decreases. As a result, there will be a low coefficient of friction and the surface consistency will improve. Similarly, the value of surface roughness (Ra) is directly proportional to the value of the corrosion intensity. This may occur because a lower surface roughness provides less room for pitting corrosion to develop. a lot of corrosion on the surface that occurs. The low temperature method has a lower roughness value and a lower corrosion rate. From the calculation of the results of the microstructure test, it can be seen that using the low temperature method will cause the grain size to be smaller than the dry method. the smaller the grain size, the lower the Icorr value, this causes the corrosion rate using the low temperature method to be even lower.

Keywords: Low Temperature Machining, Stainless Steel 316L, Surface roughness, Corrosion rate

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kasus cedera tulang di Indonesia terus meningkat. Kementerian Kesehatan menyebutkan sekitar 8 juta orang mengalami fraktur tulang. Dari data 2013, paling tinggi akibat kecelakaan lalu lintas sebanyak 46,2 persen. Jumlah kecelakaan lalu lintas, menurut Badan Pusat Statistik, naik hampir dua kali sejak 10 tahun lalu. Tahun 2007 ada 49.553 kejadian, pada 2015 menjadi 98.970 kasus. Kasus patah tulang cukup besar, karena *bone fracture* selain disebabkan oleh kecelakaan bisa juga disebabkan oleh cedera pada saat beraktivitas, terjatuh, berolah raga, osteoporosis dll. Pada dasarnya *bone fracture* ini terjadi apabila tulang menerima beban melebihi kekuatannya. Salah satu tindakan medis kasus *bone fracture* adalah dengan *internal fixations*. Tindakan ini memerlukan langkah operasi bedah untuk pemasangan komponen implan tulang seperti *screw*, *pen*, *wire* dll. Tingginya angka kasus kerusakan tulang mendorong permintaan prostesis, komponen buatan serupa tulang yang diganti atau implan tulang. Menurut BPS 2016, kebutuhan implan tulang sekitar Rp 20 triliun naik menjadi Rp 23 triliun pada 2017 dan diprediksi Rp 27 triliun tahun 2018. Selain penggunaan logam sebagai pengganti tulang, sejak tahun 2000 teknik implan gigi sudah menjadi pembahasan menarik para ahli di Indonesia. Metode ini dinilai cukup efektif dalam mengatasi berbagai permasalahan konvensional yang ada di dunia kedokteran.

Teknologi dalam bidang manufaktur yang selalu berkembang dapat membantu permasalahan bidang kedokteran. Yaitu ditemukannya biomaterial, biomaterial merupakan bahan buatan atau alami yang digunakan untuk memulihkan atau mengganti kehilangan atau kegagalan struktur biologis untuk memulihkan bentuk dan fungsinya untuk meningkatkan kualitas dan umur panjang kehidupan manusia yang biasa disebut biomaterial (Viteri dkk, 2013). Biomaterial yang ideal diharapkan menunjukkan sifat-sifat seperti biokompatibilitas yang sangat tinggi, yaitu, tidak ada respon jaringan yang merugikan selain itu harus memiliki kepadatan serendah tulang, tinggi kekuatan mekanik dan ketahanan lelah, modulus elastisitas rendah dan ketahanan aus yang baik serta ketahanan terhadap korosi yang baik (Oldani dkk, 2011). Biomaterial logam dapat dengan

mudah dikelompokkan dalam kategori berikut *stainless steel, cobalt base alloys*, *titanium base alloys* dan *specialty metallic alloys.*

Stainless steel adalah material yang mengandung senyawa besi dan setidaknya 12% Kromium untuk mencegah proses korosi (pengaratan logam). Kemampuan tahan karat diperoleh dari terbentuknya lapisan film oksida Kromium yang menghalangi proses oksidasi besi (Ferum). Kelebihan AISI 316L *stainless steel* adalah sangat sering digunakan pada dunia alat-alat bedah operasi karena memiliki ketahanan korosi yang paling tinggi dan sangat cocok untuk bahan implan. Kekerasan permukaan dari suatu bahan implan menentukan stabilitas hubungan tulang dan implan, kestabilan ditemukan pada implan dengan ditandai pembentukan jaringan tulang sehingga tercipta ikatan kuat antara implan dan jaringan tulang (Zhang et al., 2015).

Proses *Milling* adalah salah satu proses permesinan dimana benda kerja diumpankan melewati pahat berbentuk silinder yang berputar dengan memiliki beberapa sisi tajam atau disebut *Milling Cutter*. Proses *Milling* dilakukan menggunakan Mesin *Milling* dimana sumbu rotasi pahatnya tegak lurus dengan pemberian arah pemakanan. 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*.

Selama lebih dari dari satu abad, ilmu dan teknologi dalam pemesinan logam menghasilkan riset dengan memanfaatkan suhu rendah di dalam prosesnya yang biasa disebut *cryogenic*. Sebagian besar riset dan penelitian menunjukkan bahwa suhu pada temperatur *cryogenic* adalah dibawah -150ºC (123 K; 238ºF). *Cryogenic Society of America* (CSA) mendefinisikan suhu pada temperatur *cryogenic* adalah di bawah 120 K (244ºF; 153ºC) (Gunston (79)). Dan Institut Nasional Standard dan Teknologi (NIST) mendefinisikan suhu pada temperatur *cryogenic* adalah di bawah 180ºC (292ºF atau 93,15 K).

Dalam pemesinan pada suhu *cryogenic* biasanya menggunakan nitrogen cair atau LN_2 dimana telah terbukti menjadi alternatif menggantikan cairan pemotongan konvensional baik menggunakan *coolant* maupun MQL (*Minimum Quantity Lubrication*). Nitrogen dan karondioksida cair merupakan gas yang tidak mudah terbakar, tidak beracun, dan tidak berbau.

Suhu yang sangat rendah dalam pemesinan dapat meningkatkan sifat mekanik suatu logam, contohnya kekuatan tarik, kekerasan, keausan dan ketahanan lelah jika dibandingkan dengan pemesinan pada suhu ruang. Hal tersebut juga dapat menghasilkan

peningkatan kekerasan dan ketangguhan pada pahat yang dapat menyebabkan tingkat pemotongan yang lebih tinggi, konsumsi energi yang lebih rendah serta produktivitas yang lebih tinggi. Penelitian terbaru juga membuktikan bahwa pemesinan dengan suhu yang sangat rendah dapat secara signifikan meningkatkan kinerja fungsional pahat dalam hal keausan, ketahanan korosi serta umur pahat yang lebih lama.

Berdasarkan uraian diatas dapat kita teliti pada penilitian ini bahwa material *stainless steel* 316L dapat digunakan pada implan tulang, karena *stainless steel* 316L mempunyai ketahanan korosi yang tinggi dan tidak menimbulkan infeksi pada tubuh sesudah ditanamkan pada tubuh. Pemesinan milling menggunakan metode *low temperature* akan meningkatkan sifat mekanik pada *stainless steel* 316L, ini dikarenakan suhu rendah yang diberikan pada *stainless steel* 316L, Pemesinan milling menggunakan metode *low temperature* juga tidak memberikan limbah minyak seperti metode MQL (*minimum quantity lubrication*) atau dengan pemberian *coolant* dikarenanakan *solid* CO2 hanya akan mencair pada saat pemesinan terjadi. Oleh karena itu diharapkan pada penelitian ini mendapatkan sifat mekanik yang lebih tinggi serta kekasaran permukaan dan laju korosi yang lebih rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam pengerjaan penelitian ini adalah bagaimana pengaruh kecepatan putaran *spindle* pada *slot milling* terhadap laju korosi pada *stainless steel* 316L.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang difokuskan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesimen yang digunakan adalah baja tahan karat AISI 316L.
2. Permesinan menggunakan *slot milling dengan mesin Vertical Machining Centers* (VMC) HAAS Type VF-2.
3. Perubahan nilai tegangan listrik yang terjadi pada saat proses permesinan tidak diperhitungkan.
4. Pembahasan korosi sebatas laju korosi dan tidak membahas jenis-jenis korosi.
5. Nilai keausan *tool* tidak diperhitungkan.
6. Sebelum permesinan, *set up* pahat dan spesimen dilakukan dengan benar serta rata air.
7. Getaran saat permesinan tidak diperhitungkan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui efek *low temperatur* pada proses *slot milling* terhadap kekasaran dan laju korosi baja tahan karat AISI 316L

1.5 Manfaat Penelitian

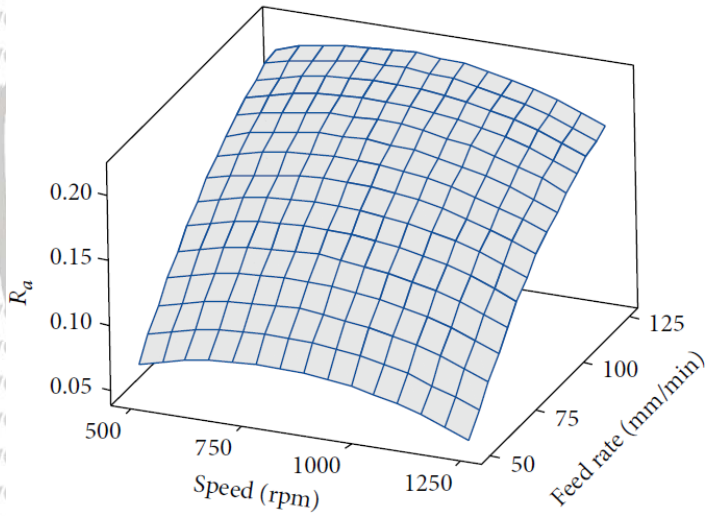
Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan pengetahuan atau wawasan kepada penulis maupun pembaca nantinya.
2. Memberikan pengetahuan ataupun masukan yang dapat diterapkan pada industri logam.
3. Dapat digunakan sebagai studi literatur pada penelitian selanjutnya mengenai *low temperature.*
4. Bisa digunakan pada alat-alat medis.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

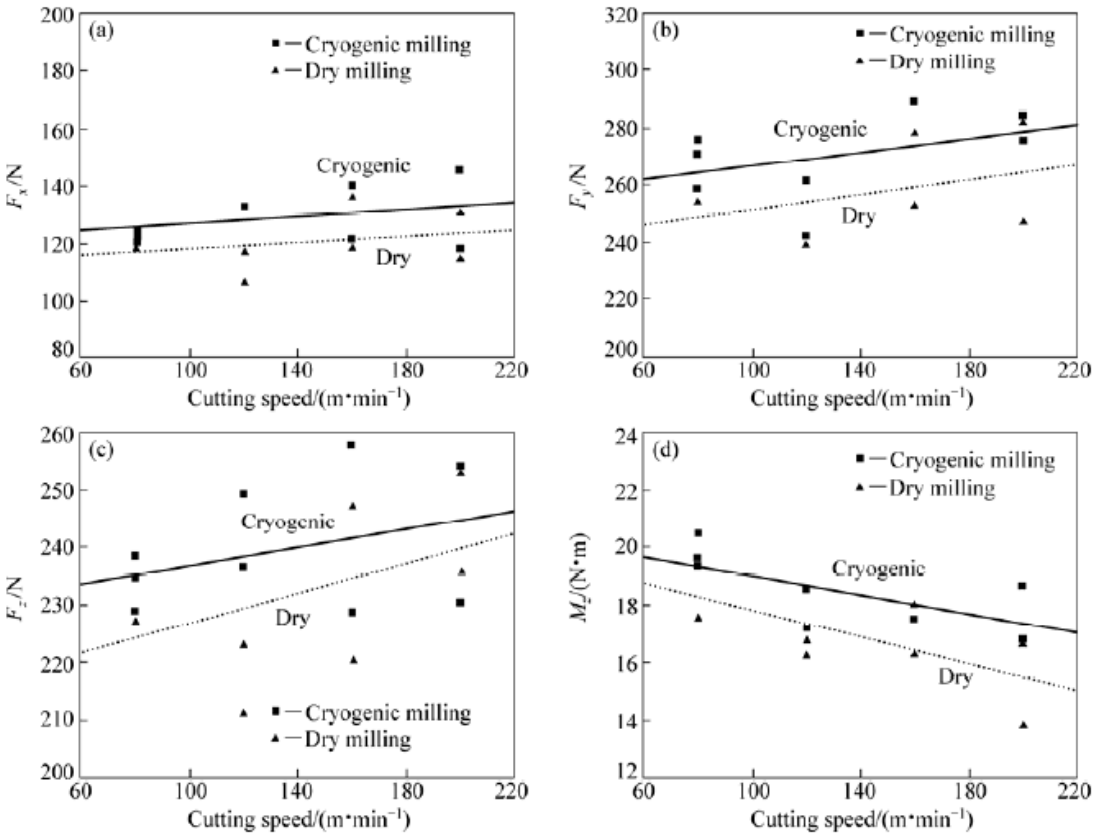
2.1 Penelitian Sebelumnya

1. Penelitian berjudul "*Optimizing Cutting Conditions for Minimum Surface Roughness in Face Milling of High Strength Steel Using Carbide Inserts*" yaitu penelitian menggunakan spesimen besi berkekuatan tinggi (*high strength steel*) dan menggunakan *carbide* sebagai mata pahat. Penelitian ini menghasilkan pengaruh parameter permesinan terhadap kekasaran permukaan dari percobaan *face milling* yaitu: "semakin tinggi kecepatan putaran *spindle* maka kekasaran permukaan semakin rendah" dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan dikutip dari (Abbas et al., 2016)



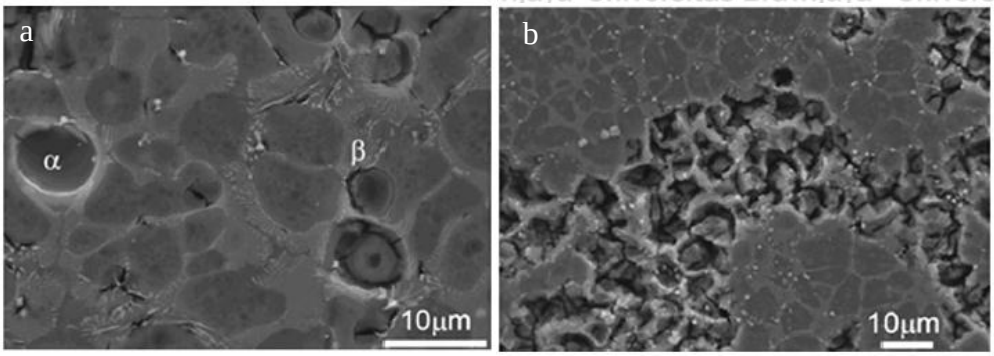
Gambar 2.1 Perbandingan *spindle speed* dan *feed rate* dengan *surface roughness*
Sumber: Abbas et al. (2016)

2. Penelitian dengan judul "*Effect of Cryogenic Cooling in Milling Process of* AISI 304 *Stainless Steel*" yaitu penelitian mengenai pengaruh *cryogenic cooling* dengan permesinan *milling* pada spesimen AISI 304 *stainless steel.* Pembahasan dari hasil perbandingan permesinan kering dan permesinan dengan *cryogenic cooling* adalah gaya pemotongan pada *cryogenic cooling* lebih besar dibandingkan dengan permesinan kering. Hal ini dikarenakan benda kerja pada *cryogenic process* lebih keras dibandingkan *dry milling* dan menyebabkan getaran yang dihasilkan pada saat *running* lebih rendah (Nalbant & Yildiz, 2011) dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perbandingan *cryogenic process* dan *dry process* dengan *cutting speed*
Sumber: Nalbant & Yildiz (2011)

3. Sebuah penelitian berjudul "*Corrosion relationships as a function of time and surface roughness on a structural AE44 magnesium alloy"* yaitu penelitian tentang pengaruh kekasaran permukaan terhadap potensi korosi. Variabel yang diamati dalam penelitian ini adalah perbandingan *dry process* dan *cryogenic process* dengan foto *scanning electron microscope* (SEM). Hasil dari penelitian ini adalah pengamatan yang dilakukan pada *dry process* menghasilkan persebaran korosi yang lebih banyak dibandingkan dengan *cryogenic process* dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan dikutip dari (Alvarez et al., 2010).



Gambar 2.3 (a) *cryogenic process* dan (b) *Dry process*
Sumber: Nalbant & Yildiz (2011)

2.2 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat (*stainless steel*) adalah jenis baja yang tidak mudah bereaksi dengan adanya oksigen di udara dan memiliki lapisan oksidasi pada permukaanya. Hal ini sangat membantu baja untuk menahan proses pengkaratan. Baja tahan karat atau biasa disebut dengan *stainless steel* dapat menahan pengaruh oksidasi di udara karena mengandung lebih dari 10,5 % kromium dan unsur inilah yang digunakan sebagai pelindung utama dari material baja terhadap gejala dari kondisi lingkungan.

Stainless Steel mempunyai beberapa tipe dan setiap tipe mempunyai sifat-sifat fisik yang berbeda-beda, sifat-sifat tersebut akan mempengaruhi penggunaan *stainless steel.* Berikut akan disajikan sifat fisik dari berbagai kategori baja tahan karat pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1
Sifat Fisik *Stainless Steel*

AISI Number	*Young's Modulus, in million of* psi	*Shear modulus, in million of* psi	*Melting Range,* °F	*Thermal Conductivity,* BTU/hr/sq-ft/ft/°F	*Coefficient of thermal expansion*	*Specific heat, BTU*/lb/°F
301, 302, 303, 308	28	12,5	2550-2590	10	$10x10^{-6}$	0,12
302B, 304, 305	28	12,5	2556-2650	10	$10x10^{-6}$	0,12
309	29	12,5	2550-2650	8	$9x10^{-6}$	0,12
310	30	12,5	2550-2650	8	$9x10^{-6}$	0,12
314	29	12,5	2550-2650	10	$8x10^{-6}$	0,12
316, 317	28	12,5	2500-255-	9	$9x10^{-6}$	0,12
321, 347	28	12,5	2550-2600	9	$10x10^{-6}$	0,12
403,405, 410	29	12,0	2700-2790	14	$6x10^{-6}$	0,11
416, 420	29	12,0	2700-2790	14	$5.5x10^{-6}$	0,11
440A, B, C	29	12,0	2500-2750	14	$5.5x10^{-6}$	0,11
501, 502	29	12,0	2700-2800	21	$6.5x10^{-6}$	0,11

Sumber: (Austin & Parker, 1967)

2.2.1 Klasifikasi Stainless Steel

1. Baja Tahan Karat Martensitik (*Martensitic Stainless steel*)

Baja tahan karat *martensitic* dibuat dengan mengubah baja paduan dari fase *austenite* ke *martensite*. Perubahan menjadi *martensite* terjadi bila baja paduan dipanaskan pada kisaran suhu 800-1400°C dan di-*quench* menuju suhu ruang. Baja tahan karat jenis ini mengandung *chromium* kurang dari 17% dan karbon hingga 1%. Baja tahan karat jenis ini juga memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja tahan karat *austenitic* dan *feritic*. Baja tahan karat *martensitic* biasanya digunakan sebagai bahan pembuat pisau kualitas tinggi dan dan *ball bearing*. *Stainless steel martensitic* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe antara lain:

a. Tipe 410

Memiliki kandungan kromium sebesar 13% dan karbon 0,5%. Ini paling banyak digunakan dalam pengerjaan dingin.

b. Tipe 416

Memiliki kandungan kromium sebesar 13% dan karbon 0,5% dan sulfur.

c. Tipe 431

Memiliki kandungan kromium sebesar 17,5%, nikel 2,5% dan maksimum kandungan karbon 0,15%.

2. Baja tahan karat austenitik

Baja tahan karat austenitik memiliki struktur *face-centered cubic* (FCC). Struktur ini dapat menggunakan secara bebas unsur-unsur penyebab astenik seperti nikel, mangan, dan nitrogen. Baja ini dapat bersifat nonmagnetik di kondisi Anil dan dapat dikeraskan hanya dengan pengerjaan dingin (*cold working*). Biasanya memiliki sifat-sifat kekuatan di temperatur tinggi yang baik. kandungan kromium biasanya bervariasi antara 16% sampai 26%. Molybdenum, tembaga, silikon, Aluminium, *Titanium*, dan *niobium* dapat ditambahkan untuk mendapatkan sifat-sifat yang dibutuhkan seperti bahan akan oksidasi. Pada *stainless steel* austenit diklasifikasikan menjadi beberapa tipe antara lain:

a. Tipe 304

Tipe ini dibuat dengan kandungan karbon rendah sebesar 0,08% dan kromium sebesar 18 hingga 20% dengan tambahan unsur mangan dan nikel, sehingga sangat baik pada lingkungan dengan kelembaban tinggi.

b. Tipe 321

merupakan variasi perkembangan dari Tipe 304 namun dengan penambahan unsur *titanium* sehingga baik dalam pengerjaan dengan suhu tinggi.

c. Tipe 347

merupakan variasi perkembangan dari Tipe 304 namun dengan penambahan unsur *niobium* sehingga memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

d. Tipe 316

tipe ini ada penambahan unsur molibdenum 2%-3% memberikan pertambahan per lingkungan terhadap korosi air laut dan penambahan unsur nikel 12% agar tetap mempertahankan struktur austenitiknya.

e. Tipe L grade

Tipe-tipe 316L, 317L,xxL (*Low carbon Steel*). pada tipe-tipe ini dibatasi memiliki kandungan unsur karbon yang rendah. hal tersebut mengurangi kekuatan fisik dan mekanik akan tetapi memiliki sifat tahan korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan tipe lain.

3. Baja Tahan Karat Feritik (*Ferritic Stainless Steel*)

Baja tahan karat *ferritic* merupakan baja dengan campuran *chromium* 10,5%-30% dan karbon kurang dari 0,12%. Nikel tidak digunakan pada baja tahan karat *ferritic* kecuali dalam jumlah kecil (kurang dari 1% pada paduan tertentu). Baja tahan karat *ferritic* memiliki struktur mikro *ferrite* dan bersifat *ferromagnetic*. Baja tahan karat jenis ini relatif murah. Baja tahan karat *ferritic* juga memiliki tingkat kekuatan yang baik dan memiliki sifat mampu bentuk yang cukup. Pada *Stainless Steel Ferritic* diklasifikasikan menjadi beberapa tipe antara lain:

a. Tipe 409

Mempunyai kandungan *titanium* dan krom dengan 11% krom. Aplikasi tipe 409 adalah perlindungan terhadap oksidasi dan korosi pada baja karbon seperti pada knalpot kendaraan untuk menjadikannya bebas karat.

b. Tipe 410S

Memiliki kandungan karbon rendah dengan tambahan *titanium* dan *columbium*. Sifat utamanya yaitu tahan terhadap suhu tinggi sehingga tidak retak ketika dilas.

c. Tipe 430

Mempunyai kandungan kromium sebesar 17% dan kandungan karbon yang rendah sebesar 0,12%. dan juga tahan hingga suhu 800ºC.

4. Baja Tahan Karat *Duplex*

Padatan dupleks merupakan baja dengan paduan kromium, nikel, dan *molybdenum* yang memiliki campuran (dupleks) struktur mikro dengan persentase ferit dan austenit hampir sama (keduanya sekitar 50%). Sifat tahan karat dari baja tahan karat *duplex* mirip dengan baja tahan karat austenitik tetapi memiliki kekuatan yang lebih tinggi dari pada baja tahan karat austenitik. Selain itu, padatan dupleks juga memiliki ketahanan retak akibat karat yang lebih baik daripada baja tahan karat austenitik. Sifat lain dari baja tahan karat ductless antara lain lebih ulet serta memiliki sifat mampu bentuk dan mampu las yang lebih baik. Pada *stainless steel duplex* diklasifikasikan beberapa tipe antara lain:

a. UNS S31803

Merupakan tipe kelas dupleks yang paling banyak digunakan, mengandung unsur karbon 0,03%, kromium 22%, nikel 5,5%, dan 0,15% nitrogen.

b. UNS S32750

Tipe ini memiliki sifat mekanik yang sama dengan tipe 316. Unsur yang terkandung pada tipe ini adalah karbon 0,03%, kromium 23%, nikel 7%, molibdenum 4% dan nitrogen 0,028%.

2.2.2 Baja Tahan Karat AISI 316L

AISI 316L *stainless steel* merupakan bagian dari jenis-jenis *stainless steel*. AISI 316L *stainless steel* banyak digunakan sebagai bahan dasar alat-alat medis, khususnya untuk proses pembedahan. Dalam AISI 316L *stainless steel* mengandung 2% - 3% molibdenum yang sengaja ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan korosi dalam lingkungan yang mengandung klorida (Cl).

Pada setiap jenis tekstil pasti memiliki sifat mekanik yang berbeda-beda. Pada titik pemberian perlakuan panas (*heat treatment*) akan memberikan sifat mekanik yang berbeda, sifat mekanik dan listrik dapat dilihat pada Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2.2
Sifat Mekanik *Stainless Steel*

AISI Number	*Condition*	*Tensile Strenght* (1000) psi	0,2% *yield strengh,* (1000) psi	*Elongation* %, 2 in	% *reduction area*	*Hardness*	
						rockwell	*Brinell*
302B	*Annealed*	95	40	50	65	B85	165
303,303SE	*Annealed*	90	35	50	55	B84	160
304	*Annealed*	85	35	55	65	B80	150
304L	*Annealed*	80	30	55	65	B76	140
305	*Annealed*	85	37	55	70	B82	156
308	*Annealed*	85	35	55	65	B80	150
309,309S	*Annealed*	90	40	45	65	B85	165
310,310S	*Annealed*	95	40	45	65	B87	170
314	*Annealed*	100	50	45	60	B87	170
316	*Annealed*	85	35	55	70	B80	150
316L	*Annealed*	78	30	55	65	B76	145
317	*Annealed*	90	40	50	55	B85	160
321	*Annealed*	87	35	55	65	B80	160
347,348	*Annealed*	92	35	50	65	B84	160

Sumber: Earl R. Parker (1967)

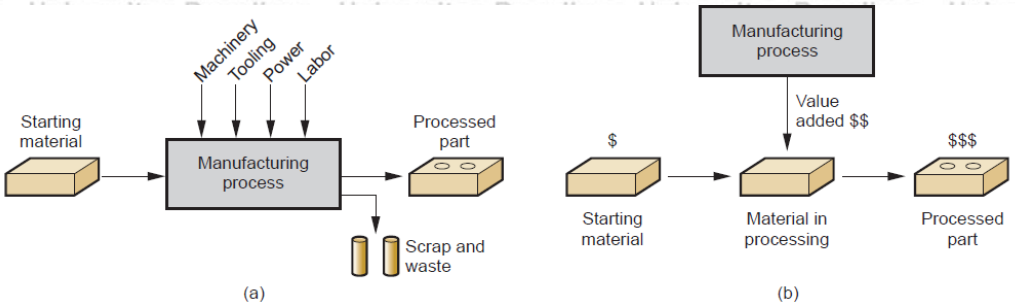
Tabel 2.3
Unsur AISI 316L *Stainless Steel*

Unsur (%)	AISI 316L
Carbon (c)	0,03
Manganese (Mn)	2,00
Phosporus (P)	0,045
Sulfur (S)	0,03
Silicon (Si)	0,75
Chromium (Cr)	16-18
Nikle (Ni)	10-14
Molybdenum (Mo)	2-3
Nitrogen (N)	0,10
Ferrous (Fe)	67,8

Sumber: ASTM A240 (2003)

2.3 Proses Manufaktur

Proses manufaktur bisa didefinisikan dalam 2 (dua), 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 dapat dilihat pada Gambar 2.4.



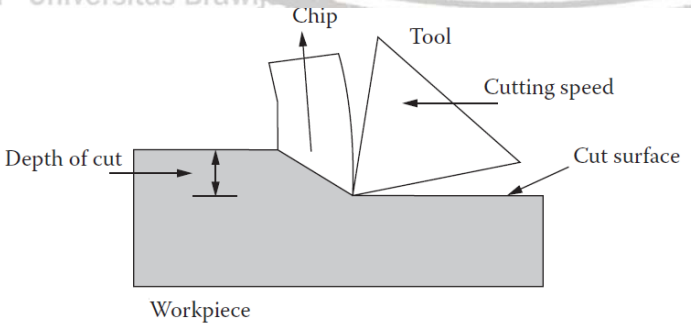
Gambar 2.4 Pendefinisian manufaktur
Sumber: Chad Bolding et al., (2010)

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, 2010:4)

2.4 Proses Permesinan (*Machining*)

Menurut Kalpikjian, (2010:556) proses permesinan (*machining*) adalah salah satu dari bagian manufaktur karena pada proses ini akan mengurangi bentuk geometri dari suatu permukaan material hingga dalam produksi *chips*. Proses ini terdiri dari beberapa sub proses yaitu: proses *turning*, proses *cutting off*, proses *slab milling* dan proses *end milling*.

Secara umum, proses permesinan (*machining*) dilakukan untuk *finishing* pada benda kerja yang dihasilkan dari proses *casting* dan *forming* sebelum disatukan pada proses *assembling* dan siap untuk digunakan atau dipasarkan dapat dilihat pada Gambar 2.5. (El-Hofy, 2014:1)



Gambar 2.5 Proses *machining*
Sumber: Eldesouky et al., (2014)

2.5 Gaya yang Bekerja pada Proses Pemesinan

Berikut adalah jenis gaya-gaya yang bekerja pada proses pemesinan dan dapat dilihat pada Gambar 2.6:

1. Gaya Gesek / *Friction Force* (F)

   Gaya gesek dalam pemesinan adalah gaya yang menahan aliran *chip* di sepanjang permukaan pahat.

2. Gaya Geser / Shear Force (Fs)

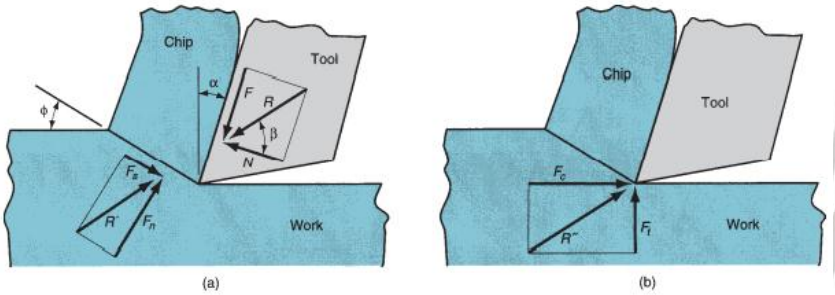
   Gaya geser dalam pemesinan adalah gaya yang menyebabkan *shear deformation* pada bidang geser.

3. Gaya Potong / Cutting Force (Fc)

   Gaya potong dalam pemesinan adalah gaya yang searah dengan pemotongan dan juga searah dengan kecepatan potong (v).

4. Gaya Aksial / Axial Force

   Gaya Aksial dalam pemesinan adalah gaya yang tegak lurus dengan gaya potong yang mana sama dengan ketebalan *chip* sebelum dipotong.



Gambar 2.6 Gaya-gaya pada Proses Pemesinan; (a) Gaya yang Bekerja pada pemotongan orthogonal, (b) Gaya yang Bekerja pada Pahat yang Dapat Diukur Oleh Alat Ukur

Sumber: Groover (2010:493)

2.6 Konduksi dalam Konduktivitas Termal

Konduksi adalah proses perpindahan panas atau transfer energi termal dalam suatu material antar molekul dengan gerakan termal murni dan tidak ada perpindahan massa. Oleh karena itu, konduktivitas termal suatu material adalah kemampuan perpindahan energi dengan mekanisme konduksi melalui material itu sendiri. Koefisien konduktivitas termal memiliki satuan J/s mm ^{o}C. Koefisien konduktivitas termal umumnya tinggi pada logam, rendah pada keramik dan plastik dapat dilihat pada Gambar 2.7. (Groover, 2010)

$$K = k\rho C \quad \text{.....(2-1)}$$

Keterangan:

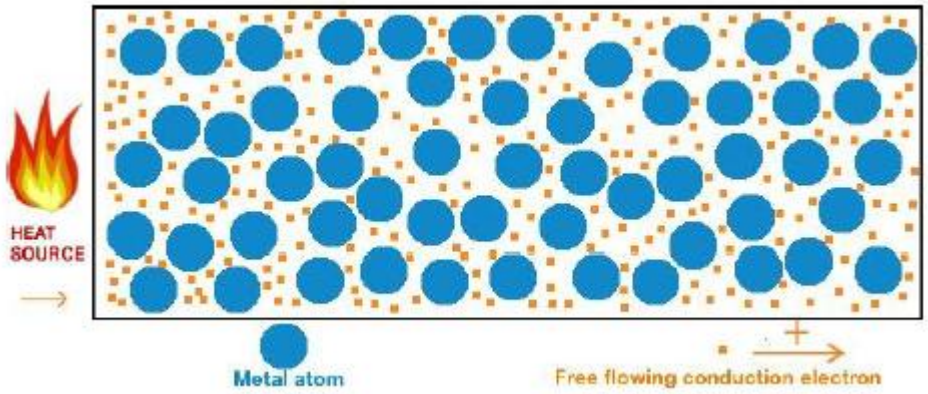
K = Difusivitas termal (m^2/s)

k = Koefisien konduktivitas termal (J/s mm ºC)

ρ = Densitas (kg/m^3)

C = Panas Spesifik (Cal/g ºC)

Sumber: Groover (2010)



Gambar 2.7 Proses konduksi

2.7 Proses *Milling*

Proses *milling* adalah salah satu proses permesinan dimana benda kerja diumpankan melewati pahat berbentuk silinder yang berputar dengan memiliki beberapa sisi tajam atau disebut *Milling Cutter*. Proses *Milling* dilakukan menggunakan Mesin *Milling* dimana sumbu rotasi pahatnya tegak lurus dengan pemberian arah pemakanan. 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, 2010:523).

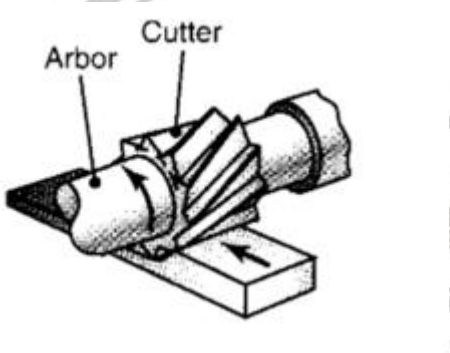
Berdasarkan orientasi *spindle* yang memutar sumbu utamanya, mesin *milling* dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

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

Macam-macam jenis operasi *milling* antara lain adalah :

1. *Peripheral Milling*

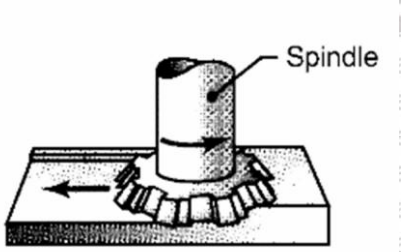
Pada proses *peripheral milling* atau biasa disebut *plain milling*, sumbu rotasi pemotongan sejajar dengan permukaan benda kerja. *Milling cutter* pada kondisi ini umumnya terbuat dari baja berkecepatan tinggi, memiliki sejumlah mata pahat di sekeliling permukaannya dapat dilihat pada Gambar 2.8 (Kalpakjian & Schmid, 2009).



Gambar 2.8 Peripheral milling
Sumber: Kalpakjian & Schmid (2009:661)

2. *Face Milling*

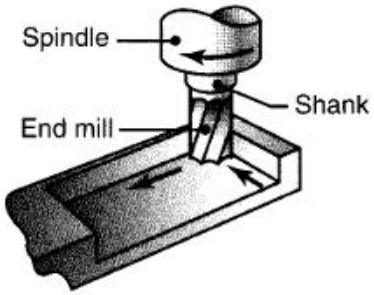
Face milling memungkinkan *cutting tool* membentuk benda kerja dengan lebih variatif. *Milling cutter* berputar pada kecepatan putaran n, dan benda kerja bergerak sepanjang jalurnya pada kecepatan linier v dapat dilihat pada Gambar 2.9 (Kalpakjian & Schmid, 2009).



Gambar 2.9 Face milling
Sumber: Hong et al. (2009)

3. *End Milling*

End milling dapat menghasilkan permukaan yang rata serta berbagai profil. *Cutting tool* berputar pada sumbu tegak lurus terhadap benda kerja, tetapi juga dapat dimiringkan untuk menghasilkan *curved surface* (Kalpakjian & Schmid, 2009). Pada penelitian ini, proses yang akan dilakukan pada mesin *milling* adalah proses *end milling.* Sumber lain menyatakan bahwa proses *end milling* merupakan bagian dari *face milling* dimana sumbu rotasi pahat tegak lurus *(perpendicular)* dengan benda kerja dan prosesnya dilakukan dengan memotong bagian terluar benda kerja secara berkeliling oleh *milling cutter* dapat dilihat pada Gambar 2.10. (Groover, 2010:524).



Gambar 2.10 Proses end milling
Sumber: Kalpakjian (2010:661)

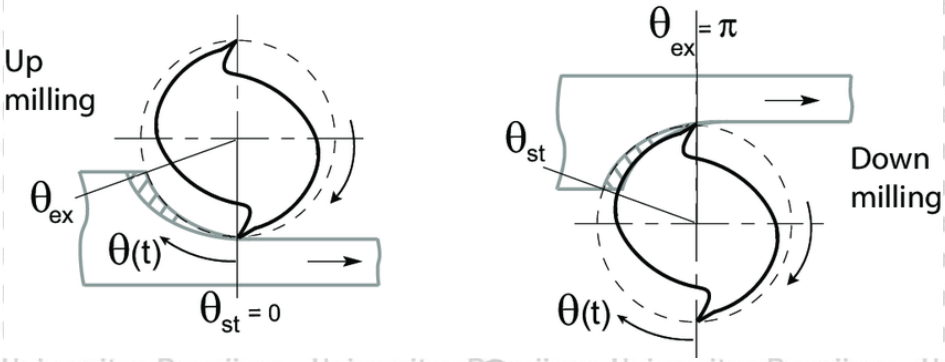
2.7.1 Proses *Up Milling* dan *Down Milling*

Proses *Up Milling* (*Conventional Milling*) adalah bagian dari proses *milling* dimana arah gerakan rotasi dari *milling cutter* berlawanan dengan arah pemakanan (*feed direction*). Sedangkan Proses *Down Milling* (*Climb Milling*) gerakan rotasi dari milling cutter searah dengan arah pemakanan (*feed direction*) ketika sedang melakukann proses pemotongan. (Groover, 2010:524).

Proses *Up Milling* sering digunakan karena proses pemotongan dilakukan dengan cara yang halus dibuktikan dengan yang melakukan pemotongan adalah sisi yang tajam. *Cutter* akan lebih dulu bergesekan dengan permukaan benda kerja sebelum benar-benar mulai memotong sehingga meringankan beban *cutter.* Namun, ada kecenderungan menghasilkan *chatter* yang berlebihan karena arah putaran pemotongan yang berlawanan.

Proses *Down Milling* jarang digunakan karena *impact forces* yang dihasilkan ketika proses pemotongan mengharuskan pengoperasian berada dalam pengaturan holding atau penahanan yang *rigid* (kaku). *Down Milling* tidak cocok dilakukan dalam material yang memiliki skala permukaan seperti logam dengan pengerjaan panas, hasil *forging,* dan hasil *casting.* Sifat abrasif yang timbul menyebabkan keausan dan kerusakan pada *cutter teeth*

sehingga memperpendek umur alat dapat dilihat pada Gambar 2.11 (Kalpakjian, 2010:662).



Gambar 2.11 proses *up milling* dan *down milling*
Sumber: Bhattacharyya & Gupta (2008)

2.7.2 Parameter Permesinan pada Proses End Milling

Parameter pemotongan merupakan kondisi-kondisi yang ditentukan dalam melakukan proses permesinan. Terdapat beberapa macam parameter pemotongan pada proses *End-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:

$$V_c = \frac{\pi .D.N}{1000} \quad \text{..... (2-2)}$$

   dengan:

   V_c = Kecepatan pemotongan (m/min)

   D = Diameter pahat potong (mm)

   N = *Spindle speed* (rpm)

   Sumber: Davim (2011:222)

   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:

$$f_z = \frac{Vf}{z \,.\, N} \quad \text{.....(2-3)}$$

dengan:

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

V_f = *Feed rate* (mm/min)

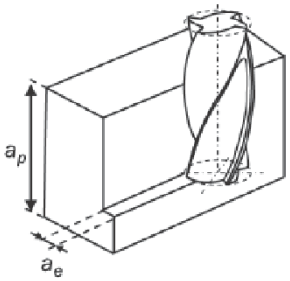
z = Jumlah sudu pahat (tooth)

N = Kecepatan putaran *spindle* (rpm)

Sumber: Davim (2011:223)

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 dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Axial Depth of Cut (a_e) dan *Radial Depth of Cut (a_p)*
Sumber: Davim (2011)

4. *Material removal rate*

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

$$R_{MR} = w \,.\, d \,.\, V_f \quad \text{.....(2-4)}$$

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 (2010:527)

2.7.3 *Vertical Machining Centers* (VMC)

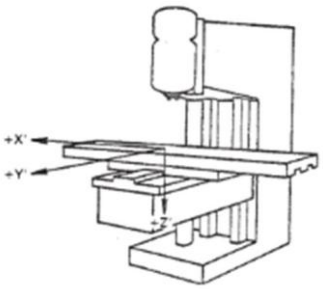
Vertical Machining Centers (VMC) dapat dilihat pada gambar 2.13 adalah mesin *milling* vertical yang bisa digunakan dan memiliki kapabilitas untuk melakukan berbagai operasi pada benda kerja dengan rongga atau *cavity* yang dalam, seperti *mold* dan *die*. Perbedaan *vertical milling centers* dan *Vertical Milling Machine* adalah terdapat *Tool Magazine* (Rumah Pahat) di sisi sebelah kiri yang memiliki kemampuan mengganti *tool* secara otomatis dan semua pengoperasian dan pergerakan berada pada suatu *control panel computer* yang berada pada sisi kanan.

Karena dorongan kekuatan dalam permesinan vertikal diarahkan ke bawah, mesin ini memiliki kekakuan yang tinggi dan menghasilkan *part* dengan akurasi dimensi yang baik. (Kalpakjian, 2010:698)

Gambar 2.13 Mesin *Vertical Machining Center* HAAS *VF 2*
Sumber: Haas VF2 *Operation 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 cartesius dengan penjelasan sebagai berikut dan dapat dilihat pada Gambar 2.14:

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.



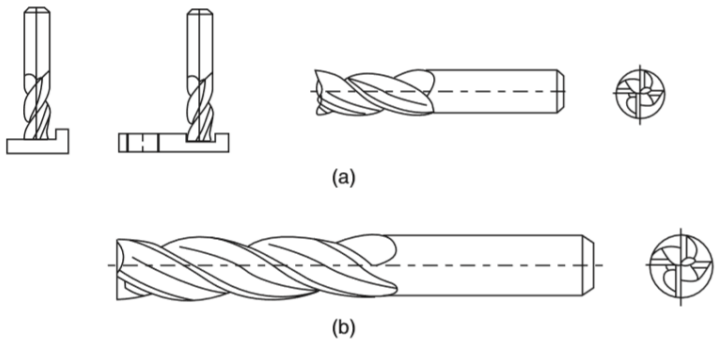
Gambar 2.14 Sistem persumbuan pada mesin *milling*
Sumber: Eksioglu et al. (2012)

2.8 *End Mill Cutter*

Cutting Tool yang digunakan pada proses *milling* adalah *milling cutter* yang pada dasarnya memiliki bentuk bulat pada ujungnya dan disekelilingnya beralur serta bergerigi. *Milling Cutter* yang digunakan pada proses *end milling* adalah *end mill cutter* yang biasanya memiliki dua mata sayat atau lebih dengan ukuran yang bervariasi dari besar sampai kecil.

End mill cutter biasanya diproduksi dengan berbagai macam material sesuai dengan kegunaannya dalam benda kerja pada proses permesinan dan dapat dilihat pada gambar 2.15, diantaranya adalah:

1. *Cobalt high speed steel* (*super H.S.S.*)
2. *Coated H.S.S.*
3. *Solid carbide*
4. *Micrograin solid carbide*
5. *Indexable inserts of cemented carbide* atau *coated carbide.*



Gambar 2.15 Solid carbide end mills (a)short series, (b) long series
Sumber: Velev & Gupta (2009)

Terdapat berbagai macam bentuk dan kegunaan dari *end mill cutter*, diantaranya adalah:

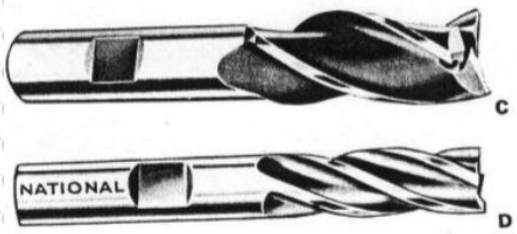
1. *End Mill Cutter* dengan Dua Mata Sayat

Pahat ini hanya memiliki dua mata sayat (*Flute*). Pahat ini dapat digunakan sebagai bor dan dapat juga digunakan untuk membuat alur dapat dilihat pada Gambar 2.16.

Gambar 2.16 End mill cutter dengan dua *flute*
Sumber: Rahdiyanta et al. (2020)

2. *End Mill Cutter* dengan Mata Sayat Lebih dari Dua

Pahat ini memiliki tiga, empat, enam, dan delapan sisi mata sayat dan biasanya memiliki diameter di atas 2 mm. Kegunaannya hampir sama dengan *end mill cutter* dengan dua mata sayat dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 End Mill Cutter dengan *flute* lebih dari dua
Sumber: Rahdiyanta et al. (2020)

3. *Ball End Mill Cutter*

Pahat ini digunakan untuk pengefraisan *fillet* atau alur dengan *radius* pada permukaannya, untuk alur bulat, lubang, bentuk bola dan untuk semua pengerjaan bentuk *radius* atau *contour* dapat dilihat pada Gambar 2.18.

Gambar 2.18 Ball end mill cutter
Sumber: Larché et al. (2019)

2.9 Korosi

2.9.1 Definisi

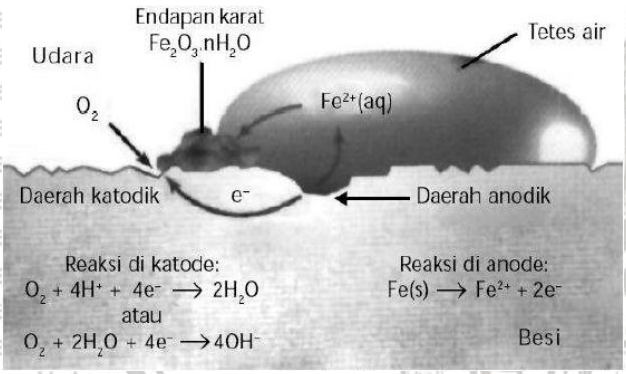
Korosi adalah penurunan kualitas suatu material (umumnya logam) yang dihasilkan dari reaksi dengan lingkungannya (Larché et al., 2019). Korosi atau pengkaratan merupakan fenomena kimiawi pada bahan logam yang pada dasarnya merupakan reaksi logam menjadi ion pada permukaan logam yang terkontak langsung dengan lingkungan berair dan mengandung oksigen. Contoh yang paling umum, yaitu kerusakan logam besi dengan terbentuknya karat oksida. Dengan demikian, korosi menimbulkan banyak kerugian.

Korosi logam melibatkan proses anodik, yaitu oksidasi logam menjadi ion dengan melepaskan elektron ke dalam permukaan logam dan proses katodik yang mengkonsumsi elektron tersebut dengan laju yang sama, proses katodik biasanya merupakan reduksi ion

hidrogen atau oksigen dari lingkungan sekitarnya. Korosi dapat terjadi apabila terdapat empat elemen di bawah ini dapat dilihat pada Gambar 2.19:

- Anoda
  Terjadi akibat reaksi oksidasi, maka daerah tersebut akan timbul korosi
  $M \longrightarrow M^{+} + e$
- Katoda
  Terjadi reaksi reduksi, daerah tersebut mengkonsumsi elektron
- Elektrolit
  Tempat elektron bergerak yang menghubungkan antara anoda dan katoda
- *Electrical Path*
  Tempat arus mengalir dari katoda ke anoda atau konduktor

Agar korosi dapat terjadi, keempat elemen tersebut harus ada. Jika salah satu dari keempat elemen tersebut tidak ada, maka korosi tidak akan terjadi.



Gambar 2.19 Proses korosi
Sumber: Hidayat (2015:4)

Pada Gambar 2.19 ditunjukan mekanisme terjadinya korosi. Reaksi korosi yang akan terjadi adalah:

Pada Anoda : $Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ (oksidasi)

Pada Katoda : $2H_2O + O_2 + 4e \longrightarrow 4OH^{-}$ (reduksi)

$Fe^{2+} + 4OH^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2$

$2Fe(OH)_2 + O_2 \longrightarrow Fe_2O_3.\ 2H_2O$ (karat)

Adapun proses yang terjadi selain oleh reaksi kimia biasa, maka yang lebih umum adalah proses elektrokimia. Yang dimaksud dengan lingkungannya dapat berupa udara dengan sinar matahari, embun, air tawar, air laut, air danau, air sungai dari tanah yang berupa tanah pertanian, tanah rawa, tanah kapur, dan tanah berpasir/berbatu.

Korosi disebut juga suatu penyakit dalam dunia teknik, walaupun secara langsung tidak termasuk produk teknik. Studi dari korosi adalah jenis usaha pengendalian kerusakan agar serangannya serendah mungkin dan dapat melampaui nilai ekonomisnya, atau jangan ada logam jadi rongsokan sebelum waktunya. Caranya adalah dengan pengendalian secara preventif agar menghambat serangan korosi. Cara ini lebih baik daripada memperbaiki secara represif yang biasanya akan jauh lebih besar.

Korosi dapat berjalan secara cepat ataupun lambat tergantung dari material bahan, lingkungan, temperatur dan lain sebagainya. Dalam dunia teknik, material korosi yang sering disinggung adalah korosi pada logam dan standar elektroda potensial dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4
Standar Elektroda Potensial

Reaction	E^0($V_{vs.\ SHE}$)	
$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1.498	Noble
$Pt^{2+} + 2e^- \rightarrow Pt$	+1.18	↑
$Pd^{2+} + 2e^- \rightarrow Pd$	+0.951	
$Hg^{2+} + 2e^- \rightarrow Hg$	+0.851	
$Ag^{+} + e^- \rightarrow Au$	+0.800	
$Cu^{+} + e \rightarrow Cu$	+0.521	
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0.342	
$2H^{+} + 2e^- \rightarrow H_2$	0.000	
$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	−0.126	
$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	−0.138	
$Mo^{3+} + 3e^- \rightarrow Mo$	−0.200	
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	−0.257	
$Co^{2+} + 2e^- \rightarrow Co$	−0.28	
$Cd^{2+} + 2e^- \rightarrow Cd$	−0.403	
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	−0.447	
$Ga^{3+} + 3e^- \rightarrow Ga$	−0.549	
$Ta^{3+} + 3e^- \rightarrow Ta$	−0.6	
$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	−0.744	
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	−0.762	
$Nb^{3+} + 3e^- \rightarrow Nb$	−1.100	
$Mn^{2+} + 2e^- \rightarrow Mn$	−1.185	
$Zr^{4+} + 4e^- \rightarrow Ze$	−1.45	
$Hf^{4+} + 4e^- \rightarrow Hf$	−1.55	
$Ti^{2+} + 2e^- \rightarrow Ti$	−1.630	
$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	−1.662	
$U^{3+} + 3e^- \rightarrow U$	−1.798	
$Be^{2+} + 2e^- \rightarrow Be$	−1.847	
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	−2.372	
$Na^{+} + e^- \rightarrow Na$	−2.71	
$Ca^{2+} + 2e^- \rightarrow Ca$	−2.868	
$K^{+} + e^- \rightarrow K$	−2.931	↓
$Li^{+} + e^- \rightarrow Li$	−3.040	Active

Sumber: McCafferty (2010)

Pada Tabel 2.4 menunjukan harga dari potensial sel standar, dimana semakin harga tersebut bernilai positif maka logam tersebut akan mudah mengalami reduksi dan sukar mengalami oksidasi. Sebaliknya jika harga potensial sel standar bernilai negatif maka logam tersebut akan lebih mudah mengalami oksidasi dan akan sukar mengalami reduksi.

2.9.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Korosi

Menurut Hidayat, 2015 terkait faktor-faktor yang dapat mempercepat pembentukan korosi antara lain:

1. Kontak langsung logam dengan H_2O dan O_2

   Oksigen dari udara yang larut dalam air akan tereduksi, sedangkan air berfungsi sebagai media tempat berlangsungnya reaksi redoks pada peristiwa korosi. Jika jumlah oksigen dan air yang kontak dengan logam semakin banyak maka semakin cepat korosi yang akan terjadi.

2. Keberadaan zat pengotor

   Zat pengotor di permukaan logam dapat menyebabkan terjadinya reaksi reduksi tambahan sehingga lebih rentan terjadi korosi.

3. Kontak dengan elektrolit

   Keberadaan elektrolit, seperti garam dalam air laut dapat mempercepat laju korosi dengan terjadinya reaksi tambahan, semakin besar konsentrasi elektrolit juga meningkatkan laju korosi.

4. Temperatur

   Semakin tinggi temperatur maka meningkat pula energi kinetik partikel sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dan laju korosi akan semakin meningkat.

5. pH

   Pada kondisi asam atau pH<7 logam akan mudah terkorosi karena adanya reaksi reduksi tambahan yang berlangsung pada katoda.

6. Metalurgi

   Permukaan logam yang lebih kasar umumnya akan mengalami beda potensial dan memiliki kecenderungan untuk menjadi anoda yang terkorosi. Dua jenis logam yang berbeda dan saling menempel juga akan meningkatkan terjadinya korosi, karena tiap jenis logam memiliki potensial yang berbeda.

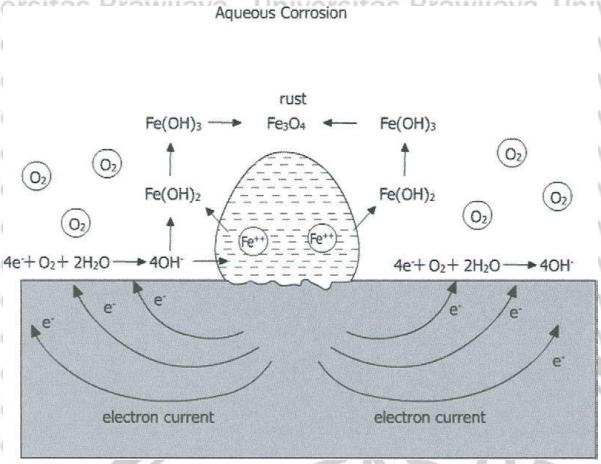
7. Mikroba

   Adanya makhluk hidup seperti mikroba pada logam dapat menyebabkan peningkatan korosi. Hal tersebut karena mikroba tersebut mampu mendegradasi logam melalui reaksi redoks untuk memperoleh energi bagi keberlangsungan hidupnya.

2.9.3 Jenis-Jenis Korosi

1. *Uniform Corrosion*

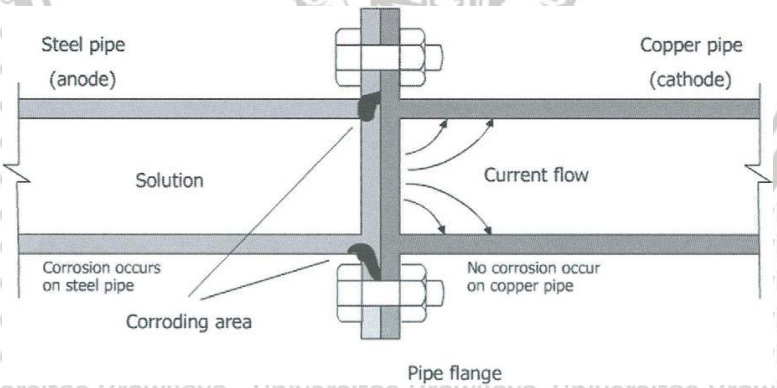
Merupakan korosi seragam dimana korosi terjadi secara merata pada permukaan logam, korosi jenis ini yang paling umum terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Korosi seragam
Sumber: Ahmad (123)

2. *Galvanic Corrosion*

Galvanic corrosion biasa disebut korosi galvanis merupakan korosi yang terjadi pada dua logam berbeda yang saling bersentuhan. Korosi galvannis ini dapat terjadi karena perbedaan potensial dimana akan menyebabkan salah satu logam menjadi anoda dan yang satu lainnya menjadi katoda dapat dilihat pada Gambar 2.21.

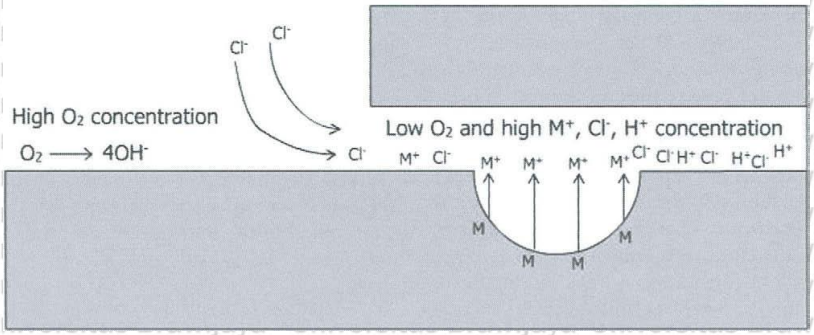


Gambar 2.21 Korosi *galvanis*
Sumber: Ahmad (128)

3. *Crevice Corrosion*

Crevice corrosion atau korosi celah merupakan korosi yang terjadi pada gap antara dua logam, umumnya terjadi pada daerah sambungan. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan konsentrasi oksigen, dimana daerah yang berkonsentrasi oksigen

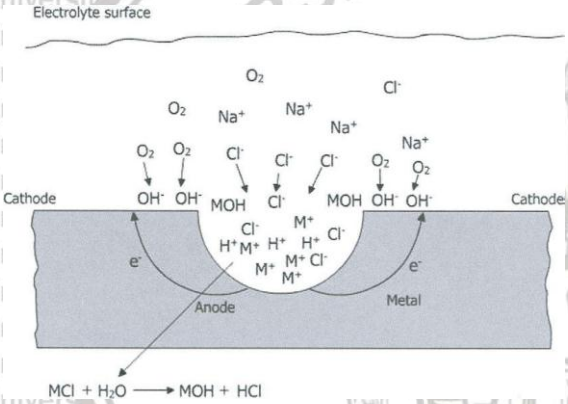
lebih tinggi akan menjadi katoda dan yang berkonsentrasi lebih rendah akan menjadi anoda dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Korosi celah
Sumber: Ahmad (144)

4. *Pitting Corrosion*

Biasa disebut korosi sumuran adalah korosi yang terjadi hanya pada daerah tertentu dan menghasilkan lubang pada logam dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Korosi sumuran
Sumber: Ahmad (151)

2.9.4 Pencegahan

Korosi tidak dapat dicegah, karena korosi merupakan gejala yang timbul secara alami. Namun menuruty Widharto, 2001 korosi dapat diperlambat pertumbuhannya dengan beberapa prinsip, yaitu:

1. Prinsip perbaikan lingkungan yang korosif
2. Prinsip netralisasi zat koroden sedemikian rupa sehingga tidak membahayakan
3. Prinsip perlindungan permukaan dengan cara:
   a. Pelapisan dengan cat
   b. Pelapisan dengan metal *coating*, *lining*, dan *cladding*
   c. Pelapisan anorganik
   d. Pembalutan

4. Prinsip penggunaan bahan yang tahan terhadap jenis korosi tertentu
5. Penggunaan zat pelambat korosi
6. Perlindungan katodik dan anodik

2.10 Laju Korosi

Laju korosi dapat didefinisikan sebagai banyaknya logam yang terlepas atau hilang setiap satu satuan waktu, perhitungan laju korosi sangat penting karena dapat memprediksi umur pakai dari suatu material. Laju korosi dapat diartikan sebagai persentase hilangnya massa, milligram per sentimeter per hari, dan gram per inci persegi per jam (Fontana, 1987).

Pada umumnya laju korosi dinyatakan dalam *mils penetatrion per year* (mpy). Namun untuk mempermudah dalam penggunaan dapat dinyatakan dalam satuan metrik, yaitu:

$$1\ mpy = 0{,}0254\ \frac{mm}{yr} = 25{,}4\frac{\mu m}{hr} = 0{,}805\frac{pm}{sec} \quad \text{.....(2.5)}$$

Laju korosi memiliki nilai antara 1-200 mpy dan memiliki tingkat penggolongannya berdasarkan laju korosi. Untuk selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut:

Tabel 2.5
Laju Korosi

Ketahanan Korosi Relatif	Mpy	mm/yr	µm/yr	nm/hr	pm/sec
Istimewa	<1	<0,02	<25	<2	<1
Baik sekali	1-5	0,02-0,1	25-100	2-10	1-5
Baik	5-20	0,1-0,5	100-500	10-50	5-20
Cukup	20-50	0,5-1	500-1000	50-150	20-50
Kurang baik	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Tidak bisa diterima	>200	>5	>5000	>500	>200

Sumber: Fontana (1987:172)

2.10.1 Pengujian Laju Korosi

Pengujian dilakukan untuk mengetahui laju korosi yang terjadi pada material. Salah satu pengujian yang dilakukan adalah pengujian laju korosi menggunakan metode polarisasi potensiodinamik. Polarisasi adalah selisih antara potensial elektroda dan potensial korosi bebas, hal ini disebabkan karena logam tidak dalam keadaan setimbang. (Gapsari, 2017)

Metode ini menggunakan potensial yang ditingkatkan secara berkelanjutan dari potensial korosinya (E_{kor}), dengan mengontrol potensialnya sehingga laju korosi dapat teramati secara langsung yang berupa kurva polarisasi potensial. Pada pengujian ini menggunakan tiga jenis elektroda yang direndam dalam larutan elektrolit. Jenis-jenis elektrodanya yaitu:

a. Elektroda kerja (*working electrode*)

Elektroda ini dibentuk dari logam benda uji yang akan diuji, terkoneksi dengan sambungan listrik.

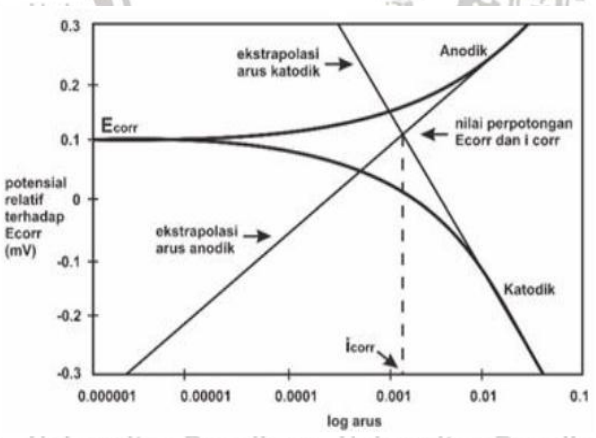
b. Elektroda bantu (*auxiliary electrode*)

Elektroda khusus yang digunakan untuk mengalirkan arus hasil proses korosi yang terjadi dalam rangkaian sel. Jenis logam yang digunakan adalah Pt.

c. Elektroda acuan (*reference electrode*)

Elektroda yang tegangan sirkuit terbuka (*open-circuit potential*) secara terbuka dan digunakan sebagai acuan elektroda kerja. Logam yang digunakan adalah Ag/Agcl.

Hasil pengujian polarisasi potensiodinamik ini berupa kurva plot antara potensial terhadap arus. Kemudian kurva tersebut diekstrapolasi tafel sehingga diperoleh nilai i_{corr}, E_{corr}, βa, βc. Polarisasi katodik dan anodik menghasilkan garis lurus dengan kemiringan (*slope*) tertentu. Titik potong antara polarisasi katodik dan anodik akan bernilai sama dengan potensial korosi (E_{corr}) dan arus korosi (I_o) seperti ditunjukan pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24 Kurva potensial anodik katodik
Sumber: Steven (2017:10)

Rumus pada laju korosi:

1. Hukum *Faraday*

Stoikiometri dari reaksi elektrokimia diatur dalam hukum *Faraday*. Massa elektroaktif W (g) dari reaksi kimia dan muatan Q (C) ditukarkan dengan proses dalam elektroda melalui persamaan elektrokimia sebagai berikut:

$$Q = \frac{n\,F\,W}{M} \quad \text{(2-6)}$$

2. Laju korosi Secara Umum

Laju korosi kemudian dapat dihitung dengan perangkat lunak ataupun dengan perhitungan manual. Setelah diketahui nilai i_{corr} lalu nilai tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan berikut: dengan membuat garis linear pada kurva anodik dan katodik, lalu dilihat perpotongannya dan didapatkan nilai i_{corr}, kemudain nilai tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan berikut:

$$Q = \frac{n\,F\,W}{M}$$

$$W = \frac{Q\,M}{n\,F}$$

$$W = \frac{i\,t\,EW}{F} \times \frac{1}{\rho\,A}$$

$$\frac{W}{t}(CR) = \frac{i}{A}\frac{EW}{\rho\,F}(cm/s)$$

$$CR = \frac{i}{A}\frac{EW}{\rho}\frac{10}{96500\;\;1/31536000}(mmpy)$$

$$CR = \frac{i}{A}10^{-6}\frac{EW}{\rho}3267.97928$$

$$CR = \frac{K\,I_{corr}\,EW}{\rho\,A} \quad \text{(2-7)}$$

Keterangan:

Q : Muatan (C)

M : *Molecular weight* (gr/mol)

n : Elektron valensi

W : Massa elektroaktif (gr)

CR : *Corrosion rate* (mmpy)

K : 3.27 x 10^{-3} mm g/µA cm yr

i : Kuat arus (A)

I_{corr} : Arus korosi (µA)

EW : *Equivalent weight*

ρ : Massa jenis material (g/cm^3)

A : Luas sampel (cm^2)

Sumber: Popov (2015:188)

2.10.2 Korosi dalam Tubuh Manusia

Logam umumnya akan mengalami korosi pada lingkungan terbuka, tak terkecuali ketika logam ditanam ke dalam tubuh manusia. Tubuh manusia mengandung cairan sekitar 60%, sebagian besar cairan tersebut adalah darah (Kuntarti, 2005). Penggunaan darah pada pengujian laju korosi tidak umum dilakukan, maka dari itu diperlukan pengganti yang memiliki kesamaan dengan darah. Salah satu larutan yang digunakan pada pengujian korosi biomaterial adalah *Hank's Balance Salt Solution* (HBSS). HBSS adalah larutan garam yang memiliki kadar pH yang mendekati darah yaitu sebesar 7,4 (Ghali, 2011). Laju korosi yang dapat ditoleransi untuk sistem implan logam harus sekitar 2,5 x 10^{-4} mm / tahun, atau 0,01 mil / tahun dan komposisi kimia pada HBSS bisa dilihat pada Tabel 2.6. (Manivasagam, 2010)

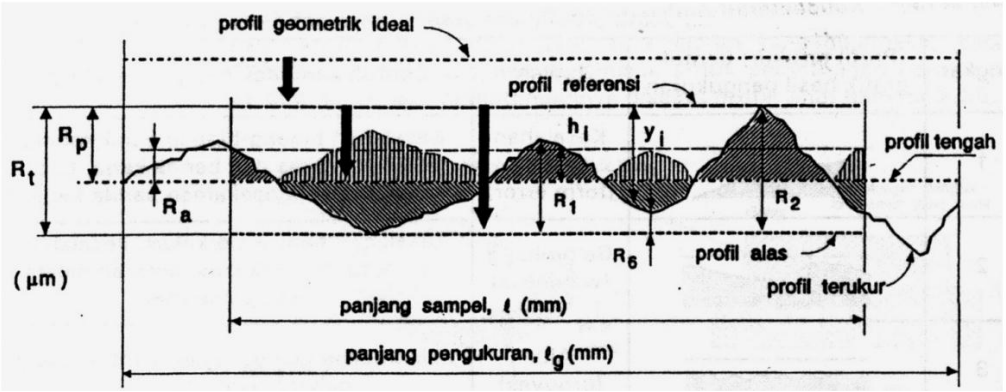
Tabel 2.6
Komposisi Kimia HBSS

Zat	komposisi *(g L^{-1})*
NaCl	*8,0*
KCl	*0,4*
$NaHCO_3$	*0,35*
$NaH_2PO4.H2O$	*0,25*
Na2HPO4.2H2O	*0,06*
$CaCl2.2H_2O$	*0,19*
MgCl2	*0,19*
$MgSO4.7H_2O$	*0,06*
glucose	*1,0*
pH	*6,9*

Sumber: (Manivasagam et al., 2010)

2.11 *Surface Roughness*

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 2.25.



Gambar 2.25 Profil kekasaran permukaan
Sumber: Rochim (2001:56)

Angka kekasaran dan Panjang Sampel Standar dapat dilihat pada Tabel 2.7 serta 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 2.7
Angka Kekasaran 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	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Sumber: Rochim (2001:62)

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

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} \quad \text{.....(2-8)}$$

dengan:

Ra = Kekasaran permukaan rata-rata (µm)

f = *Feed* (mm/rev)

NR = *Nose radius* (mm)

Sumber: (Groover, 2010:590)

Dimana nilai *feed* didapat melalui persamaan berikut.

$$f = \frac{V_f}{N} \quad \text{.....(2-9)}$$

dengan:

V_f = *Feed rate* (mm/min)

N = *Spindle speed* (rpm)

Sumber: Groover (2010, p.590)

Hubungan antara kekasaran permukaan dengan temperatur permesinan, maka terdapat persamaan sebagai berikut:

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} ; f = \frac{V_f}{N\,n}$$

$$Ra = \frac{1}{32NR}\,\frac{{V_f}^2}{N^2 n^2}$$

$$T = K\,v^m ; V_f = \left(\frac{T}{K}\right)^{\frac{1}{m}}$$

$$Ra = \frac{1}{32NR}\left(\frac{T}{K}\right)^{\frac{2}{m}} (N.n)^{-2} \quad \text{..... (2-10)}$$

Keterangan:

Ra : Nilai kekasaran permukaan rata (μm)

f : *Feed* (mm/rev)

v : *Feed rate* (mm/min)

N : *Spindle speed* (rpm)

n : *Number of teeth*

NR : *Nose radius*

T : Temperatur (ºF)

K : Difusivitas termal (m^2/s)

m : *Stainless Steel* = 0.361

Sumber: Groover (2010:501)

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 et al., 1989), 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.

2.12 *Low Temperature Machining*

Kriogenik (*cryogenic*) merupakan salah satu teknologi pembekuan yang sebetulnya bukan tergolong ide yang baru. Metode pembekuan pada teknologi ini menggunakan gas yang dimampatkan menjadi cairan (*liquid*) misalnya nitrogen (N_2) dan karbon dioksida (CO_2). Nitrogen cair sebagaimana telah diketahui sejak lama, dipergunakan sebagai pembeku bahan-bahan organik untuk keperluan penyimpanan dan ekstraksi bahan-bahan penelitian bidang biologi terapan. Karbon dioksida cair pun telah sejak lama dipergunakan untuk pengisi tabung pemadam kebakaran.

Karbondioksida rumus kimia CO_2 atau zat asam arang adalah sejenis senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Karbondioksida adalah gas yang tidak berwarna dan tidak berbau Pada keadaan standar, rapatan karbondioksida berkisar sekitar 1,98 kg/m³, Molekul karbon dioksida mengandung dua ikatan rangkap yang berbentuk linear dan ia tidak bersifat dipol. Senyawa ini tidak begitu reaktif dan tidak mudah terbakar, namun bisa membantu pembakaran logam seperti magnesium. Titik Didihnya −78 °C (195°K), titik lelehnya −57 °C (216 K).

Penggunaan nitrogen cair atau karbondioksida cair sangatlah ramah lingkungan karena mengurangi limbah *coolant* pada permesinan. Kelebihan menggunakan cairan keduanya yaitu untuk mengurangi panas akibat gesekan pahat dengan logam dimana mengurangi perubahan sifat mekanik dalam permesinan.

2.13 Hipotesis

Dalam pembahasan pada latar belakang, tinjauan pustaka, dan penelitian sebelumnya. Permesinan baja tahan karat AISI 316L dengan metode *low temperature machining* dapat menurunkan kekasaran permukaan dan berbanding lurus dengan naiknya nilai *spindle speed* dari pahat. Menurunnya nilai kekasaran permukaan sebanding dengan turunnya nilai pada laju korosi. Dapat ditarik kesimpulan permesinan *milling* dengan variasi *spindle speed* menggunakan metode *low temperature process* akan menurunkan kekarasaran pada permukaan sehingga laju korosi pada *stainless steel* 316L akan menurun sebanding dengan kecilnya (Ra) kekasaran permukaan daripada permesinan dengan suhu ruang atau metode *dry*. Dikarenakan *passivation chromium* meningkat pada saat permesinan, tidak terjadi korosi celah, dan dapat memperpanjang umur material.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental menggunakan Mesin CNC *Vertical Machining Center* HAAS VF-2 dengan tujuan untuk menganalisa pengaruh dari *low temperture machining* terhadap variasi kecepatan *spindle speed* sebagai peluang terjadinya pemotongan pada permukaan *stainless steel* 316L.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian eksperimental dan penyusunan dilakukan pada bulan 12 -24 Oktober 2020 di Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Pengukuran nilai kekasaran permukaan (Ra) dilakukan pada bulan 09-21 November 2020 di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Pengujian laju korosi pada spesimen uji dilaksanakan pada 7-19 Desember 2020 di Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Pengujian foto mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang. Foto *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan pada 13-23 April 2021 di Laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dipilih oleh peneliti sehingga tidak ada pengaruh lain. Variabel bebas yang digunakan adalah:

Spindle speed (Rpm) : 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
Depth of cut (mm) : 0,5
Feed rate (mm/menit) : 90

3.3.2 Variabel terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini berupa Laju Korosi dan *Surface Roughness* (Ra).

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang nilainya dibuat konstann selama penelitian oleh peneliti. Variabel terkontrol yang digunakan antara lain:

Spesimen : *Stainless steel* 316L
Diameter *end mill* : 6 mm
Stepover : 6 mm
Number of flutes : 2
Overhang length : 30 mm
Jenis pemakanan : *endmilling*
Temperatur (^{o}C) : -30

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

1. Mesin CNC Haas VF-2 VMC (*Vertical Machining Center)*

   Mesin Haas VF-2 VMC (*vertical machining center)* merupakan mesin CNC yang digunakan untuk proses *machining* metode eksperimental dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan spesifikasi Mesin Haas VF-2 VMC (*vertical machining center*) dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Gambar 3.1 Mesin CNC Haas VF-2 VMC *(Vertical Machining Center)*
Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2020)

Spesifikasi Mesin

Tabel 3.1
Spesifikasi Mesin HAAS VF2

	VF-2	
TRAVELS	**S.A.E.**	**METRIC**
X *Axis*	30 "	762 mm
Y *Axis*	16 "	406 mm
Z *Axis*	20 "	508 mm
Spindle Nose to Table (*~ max*)	24 "	610 mm
Spindle Nose to Table (*~ min*)	4 "	102 mm
TABLE	**S.A.E.**	**METRIC**
Length	36 "	914 mm
Width	14 "	356 mm
T-Slot Width	5/8 "	16 mm
T-Slot Center Distance	4.92 "	125.0 mm
Number of Std T-Slots	3	3
Max Weight on Table (*evenly distributed*)	3000 lb	1361 kg
SPINDLE	**S.A.E.**	**METRIC**
Max Rating	30 hp	22.4 kW
Max Speed	8100 rpm	8100 rpm
Max Torque	90 ft-lb @ 2000 rpm	122 Nm @ 2000 rpm
Drive System	*Inline Direct-Drive*	Inline Direct-Drive
Max Torque w/opt Gearbox	250 ft-lb @ 450 rpm	339 Nm @ 450 rpm
Taper	BT or CT 40	BT or CT 40
FEEDRATES	**S.A.E.**	**METRIC**
Rapids on X	1000 in/min	25.4 m/min
Rapids on Y	1000 in/min	25.4 m/min
Rapids on Z	1000 in/min	25.4 m/min
Max Cutting	650 in/min	16.5 m/min

2. *Surface Roughness Tester*

Alat ini digunakan untuk mengukur kekasaran permukaan benda yang akan diteliti per titiknya dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Gambar 3.2 Surface Roughness Tester SJ-301
Sumber: Laboratorium Metrologi Industri Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2020)

Merek : Mitutoyo
Measuring range : X *axis* (12.5 mm) dan Z *axis* (350 µm)
Stylus tip material : *Diamond*
Dimensi : 325 mm x 185 mm x 95 mm

3. Pahat *Carbide Square End Mill*

Pahat *Carbide Square End Mill* digunakan sebagai *cutting tool* dalam melakukan proses *end milling* pada penelitian ini. *End milling* adalah salah satu bagian dari *face* milling (Groover, 2010). Pahat *Carbide Square End Mill* digunakan pada proses *slot-milling* yang diumpankan di tengah-tengah *workpiece* pada penelitian ini, sifat mekanik pahat *Carbide Square End Mill* dapat dilihat pada Tabel 3.2, gambar pahat dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Merek : Nachi
Tipe : *Square End Mill*
Cutting edge diameter : 6 mm
Material : *Tungsten Carbide*
Jumlah *flute* : 2 buah
Shank diameter : 4 mm
Flute length : 2 *Flute*
Cutting length : 20 mm
Overall length : 50 mm

Tabel 3.2
Sifat Mekanik *Tungsten Carbide*

Tensile Strength, (MPa)	*Young's Modulus* (GPa)	*Density* (Mg/m^3)	*Shear Modulus* (GPa)	*Hardness*		*Ductility* (%)
				Rockwell	*Vickers*	
344	600	15.25	243	A90	1300 HV	0.05

Sumber: Azo Material (2002)

Gambar 3.3 Carbide Square End Mill Diameter *6* mm
Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2020)

Pahat yang digunakan harus lebih keras dari *workpiece*. Kekerasan pahat pada penelitin ini yaitu *Rockwell* A90, dan kekerasan *workpiece* yaitu B76. Ini membuktikan bahwa pahat lebih keras daripada *workpiece*.

Kemudian *Modulus young* pahat yang digunakan harus lebih keras dari *workpiece*. *Modulus young* dari pahat 600 GPa dan modulus *Young workpiece* yaitu 28×10^6 psi (193 GPa). Ini membuktikan bahwa *Modulus young* dari pahat lebih besar dari *workpiece*.

4. *Thermogun*

Alat ini digunakan untuk mengukur suhu saat permesinan menggunakan *dry ice* sedang dilakukan (pengukuran suhu permesinan) dapat dilihat pada Gambar 3.4.

Gambar 3.4 Thermogun
Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2020)

Spesifikasi:

Merek : Krisbow

Jenis : *Infrared Laser thermogun*

Model : KW06-304

Warna : Abu-abu

5. *Potentiosat/Galvanostat Instrument* (*Palm Sense*)

Alat ini berguna untuk mengukur laju korosi pada specimen dan dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Gambar 3.5 Potentiosat/Galvanostat Instrument
Sumber: Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (2020)

Spesifikasi alat :

Electrode connections	: 2, 3, *and* 4
Potential resolution	: 0,3 µV
Current range	: 1 A *to* 10 nA
Potential accuracy	: *+/- 0.2%*
Max. Current	: + 2 A
Compliance voltage	: +/- 30 V
Potential range	: +/- 10 V
Control software	: *NOVA*
Current accuracy	: *+/- 0.2%*
Input Impedance	: > 1 TOhm
Current resolution	: 0,0003% (*of current range*)
Potensiostat bandwidth	: 1 Mhz

Prinsip kerja dari alat ini menggunakan 3 komponen utama yaitu:

1. *Electrode*

   Pada komponen ini terdapat 3 buah elektroda didalamnya yang pertama adalah *Working Electrode* (WE), WE dalam pengujian ini merupakan benda kerja yang akan dikorosi (anoda). *Counter Electrode* (CE) dalam pengujian ini menggunakan logam platina yang akan bertindak sebagai katoda, yang berfungsi untuk menyediakan arus yang cukup untuk *working electrode*. *Reference Electrode* (RE) yang pada pengujian ini bertindak sebagai penyedia dan juga penyerap dari elektron.

2. *Potensiostat*

   Fungsi dari komponen ini adalah untuk mengatur beda potensial yang digunakan dan juga untuk membaca variasi arus yang terjadi selama penelitian. Untuk mengatur beda potensial komponen ini menggunakan *Reference Electrode* (RE) dan *Counter*

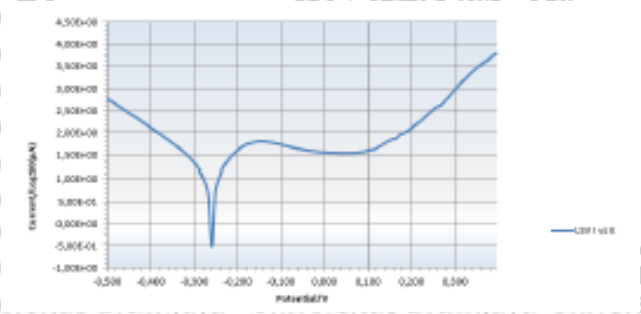
Electrode (CE) sebagai perantara dari pengaturnya. Sedangkan untuk membaca variasi arus yang terjadi selama penelitian elektroda yang digunakan adalah WE dan RE. Komponen ini membaca variasi arus yang terjadi terhadap beda potensial yang diberikan pada *corrosion test cell*. Hasil dari pembacaan dari variasi arus ini nantinya akan diteruskan menuju komputer untuk dikonversi.

3. *Software*

Software digunakan sebagai hasil dari pembacaan *potensiostat* akan dikonversikan ke dalam bentuk tabel. Sebelum mendapatkan hasil dalam *software* terlebih dahulu dimasukkan data yang berisikan beberapa parameter yaitu *density, equivalent weight* dan *surface area*. Pada Gambar 3.6 merupakan gambar parameter yang digunakan dalam penelitian pada material AISI 316 L, kondisi batas yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3.6.

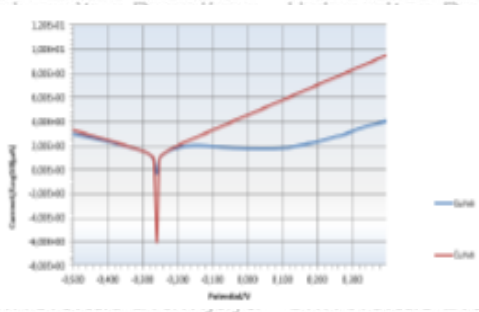
Gambar 3.6 Kondisi batas yang digunakan dalam pengujian

Hasil dari data pengujian korosi akan dimunculkan dalam bentuk grafik polarisasi korosi dan beberapa parameter lain yang telah dibaca melalui *software* ini. Gambar 3.7 merupakan grafik polarisasi korosi.



Gambar 3.7 Grafik polarisasi korosi

Pada Gambar 3.8 merupakan hasil pembacaan dari uji korosi tersebut menunjukkan tafel dari grafik polariasi korosi yang ditunujukkan dengan garis yang berwarna merah.



Gambar 3.8 Grafik polariasi korosi dengan tabel

Pada pembacaan uji korosi diatas data yang terletak pada sebelah kanan merupakan data dari hasil pembacaan yang telah dikalkulasikan secara otomatis melalui *software*. Pada gambar 3.9 merupakan contoh dari pembacaan data dari uji korosi.

E corrosion, V	-0.268
I corrosion, µA	15.37
I corrosion per surface area, A/cm²	2.672E-5
Polarization Resistance, Ω	1554
Anodic β Tafel constant, V/decade	0.089
Cathodic β Tafel constant, V/decade	0.144
Corrosion rate, mm/year	0.241

Gambar 3.9 Contoh dari hasil pembacaan data dari uji korosi

6. AISI *Stainless Steel* 316L

Digunakan sebagai *workpiece* untuk penelitian ini yang dipasang pada Mesin CNC Haas VF-2 dapat dilihat pada Gambar 3.10, sifat mekanik *stainless steel* 316L pada tabel 3.3 dan komposisi kimia *stainless steel* 316L dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Gambar 3.10 Stainless Steel AISI 316L

Tabel 3.3
Sifat Mekanik *Stainless Steel* 316L

Young's Modulus, In millions of psi	*Tensile Strength,* (1000 psi)	0,2% *Yield Strength,* (1000 psi)	*Elongation* %, 2 in	% *Reduction Area*	*Hardness* *Rockwell*	*Brinnel*	*Strength Coefficient, K (MPa)*
28	78	30	55	65	B76	145	1200

Sumber: Zackay et. al (1967)

Tabel 3.4
Komposisi Kimia dari *Stainless Steel* AISI 316L

Karbon (C)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Sulfur (S)	Silikon (Si)
0,03	2,00	0,045	0,03	0,75
Molibdenum (Mo)	Nitrogen (N)	Besi (Fe)	Krom (Cr)	Nikel (Ni)
2,2	0,10	67,8	16,7	12,4

Sumber: American Society for Testing Material (2004)

7. Larutan HBSS

Larutan *hank's balance salt solution* (HBSS) merupakan larutan pengkorosi yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada gambar 3.11.

Gambar 3.11 Larutan HBSS

8. *Aluminium Rectangular Tube*

Merupakan suatu alat berbentuk balok berongga yang digunakan sebagai wadah solid CO_2/*dry ice*. Alat ini sekaligus sebagai penghantar kalor secara konduksi dikarenakan menempel langsung dengan spesimen pada saat permesinan dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Gambar 3.12 Aluminium Rectangular Tube

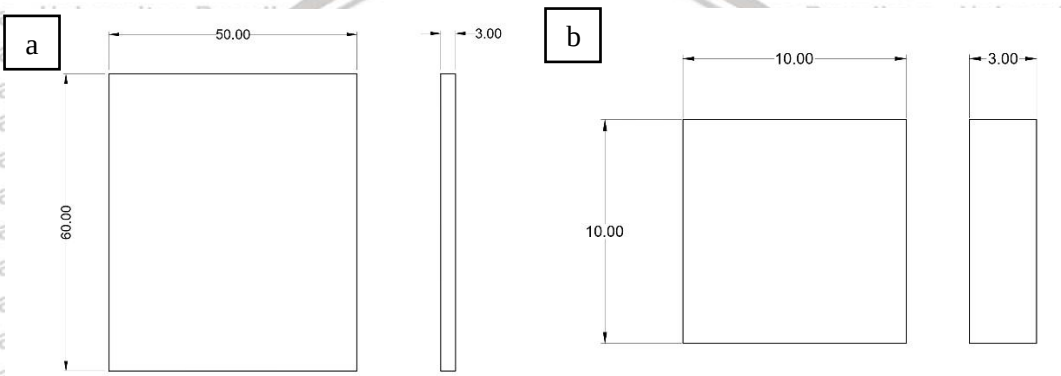
9. *Solid* CO_2/*dry ice*

Bentuk padat dari karbon dioksida (CO_2) yang digunakan sebagai media untuk mencapai *low temperature*. Suhu pada *dry ice* dapat mencapai -30,5 ºC dapat dilihat pada Gambar 3.13.

Gambar 3.13 Dry Ice

3.5 Dimensi benda

Dimensi dari Spesimen AISI 316L *stainless steel* ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Dimensi Spesimen AISI *stainless steel* 316L (a) *milling process* (b) pengujian laju korosi

3.6 Prosedur Penelitian

Langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi dua jenis prosedur, yang pertama proses permesinan menggunakan *low temperature* dan kedua menggunakan temperatur ruangan. Langkah penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

Dilakukan pemotongan pada *stainless steel* 316L untuk *milling process* dengan dimensi 6 x 5 x 0,3 cm menggunakan gerinda, masukkan dry ice pada aluminium *hollow* yang telah disediakan untuk konduksi dingin pada spesimen saat permesinan kemudian pasang dibawah spesimen uji sesuai dengan skema yang telah dibuat. Setting mesin HAAS VF-2 dengan setting sesuai dengan variabel yang telah dibuat seperti *spindle speed, depth of cut,* dan *feed rate.* Siapkan *thermogun* sesuai dengan skema untuk mengukur suhu pada saat permesinan. Pasang pahat dengan *overhang lenght* 6 cm. Cari *part zero set,* kemudian lakukan *milling process.* Melepas benda kerja dan menyimpan benda kerja. Dan ulangi sampai variabel yang telah dibuat selesai.

Selanjutnya adalah proses pengujian *surface roughness* menggunakan alat uji kekasaran yaitu *surface roughness tester* dengan merk Mitutoyo, dengan jarak pengujian yaitu 0.7 mm. Proses pemotongan spesimen uji dengan dimensi 1 x 1 cm dilakukan menggunakan gergaji tangan. Selanjutnya spesimen dibersihkan dengan bersih menggunakan kain lap. Pemotongan material dengan dimensi 1 x 1 cm dilakukan lagi agar mempermudah dalam foto digital, uji laju korosi, dan foto *scanning electron microscope.* Langkah berikutnya yaitu melakukan foto mikro menggunakan mikroskop digital. Setelah foto mikro pada spesimen telah diuji, kemudian uji *scanning electron microscope* untuk mengetahui spesimen sebelum korosi.

Solder bagian atas spesimen untuk kabel elektroda pada pengujian korosi, lakukan pelapisan *epoxy* resin untuk uji korosi yang telah dicampur dengan *hardener* dengan perbandingan 1:1. Untuk daerah alur yang telah dilakukan proses *face milling* pada spesimen dilapisi oleh cairan PVA anti lengket lalu dikeringkan, ditempelkan *double tape* agar bagian alur permesinan tidak terkena *epoxy* resin. Lepas *double tape* pada bagian alur dari permesinan untuk laju korosi. Sisakan sedikit bagian dari ujung spesimen untuk menjepit elektroda.

Setelah semua langkah diatas telah dilakukan maka spesimen siap untuk dilakukan uji korosinya dengan menggunakan larutan HBSS. Setelah pengujian laju korosi dilakukan, maka langkah berikutnya yaitu mengambil kembali foto *Scanning Electron Microscope* pada setiap spesimen uji yang telah diuji laju korosinya agar dapat dibandingkan dengan foto *Scanning Electron Microscope* pada spesimen yang diambil sebelum pengujian uji laju korosi.

Mengolah data dan mengumpulkan data untuk menarik kesimpulan dari data yang di dapat pada penilitian ini.

3.7 Prosedur Pengujian Spesimen

Pada spesimen yang telah dilakukan proses *face milling* lalu dilakukan proses pengujian spesimen dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Pengujian *surface roughness*

   Driver unit dipasang pada *surface rougness tester* yang terletak pada *height gauge*. Lalu posisikan *stylus* pada *workpiece* hingga indikator pada *surface roughness* terletak pada titik tengah. Tentukan jarak pengujian yang akan diukur, pada pengujian kali ini pilih 0,7 mm. Klik tombol *start.* Catat nilai yang terbaca pada *surface roughness tester*.

2. Pengujian foto mikrostruktur

Lakukan etsa dengan perbandingan 1(HNO3) : 2 (HCL) selama 1 menit, dan dibilas dengan air selama 10 detik. Lakukan setting alat pada komputer. Tentukan skala yang akan digunakan menggunakan millimeter blok. Gunakan perbesaran 1500x. Gambar diambil pada masing-masing spesimen, kemudian simpan.

3. Pengujian laju korosi

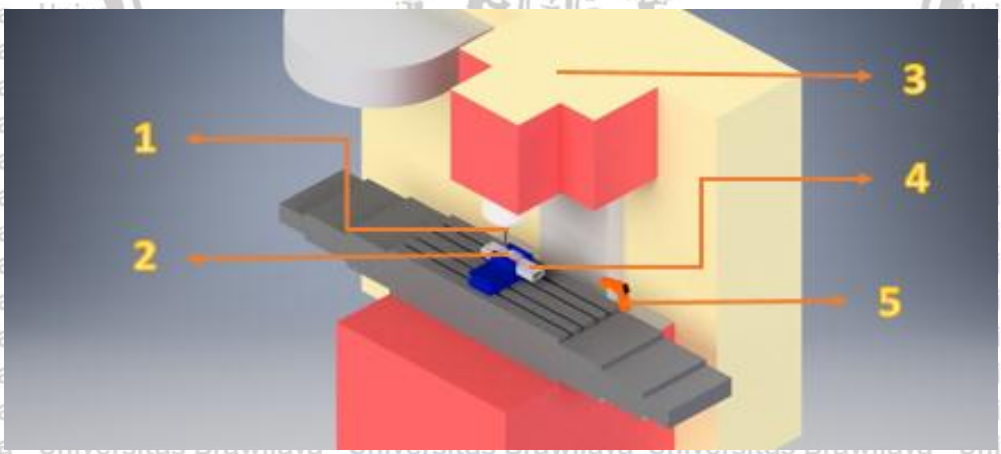
Siapkan seluruh alat dan spesimen yang akan digunakan pada pengujian ini. Siapkan larutan HBSS, Spesimen uji diletakkan pada alat uji korosi. masukkan parameter yang digunakan pada software alat uji korosi. Semua kabel yang tersedia pada alat uji korosi disambungkan kepada masing-masing *electrode* dan menuju *personal computer*. Melakukan pengukuran dan mencatat laju korosi yang terjadi pada tiap-tiap spesimen uji.

4. Mengambil gambar dari spesimen menggunakan *scanning electron microscope*

Menyiapkan spesimen uji yang akan diambil gambarnya dengan ukuran diagonal maksimal 20 mm. Lakukan pengambilan foto dari spesimen menggunakan *scanning electron microscope* dengan perbandingan 1000x dan 5000x.

3.8 Skema Penelitian

Gambar 3.15 adalah skema penelitian yang digunakan pada penelitian ini.



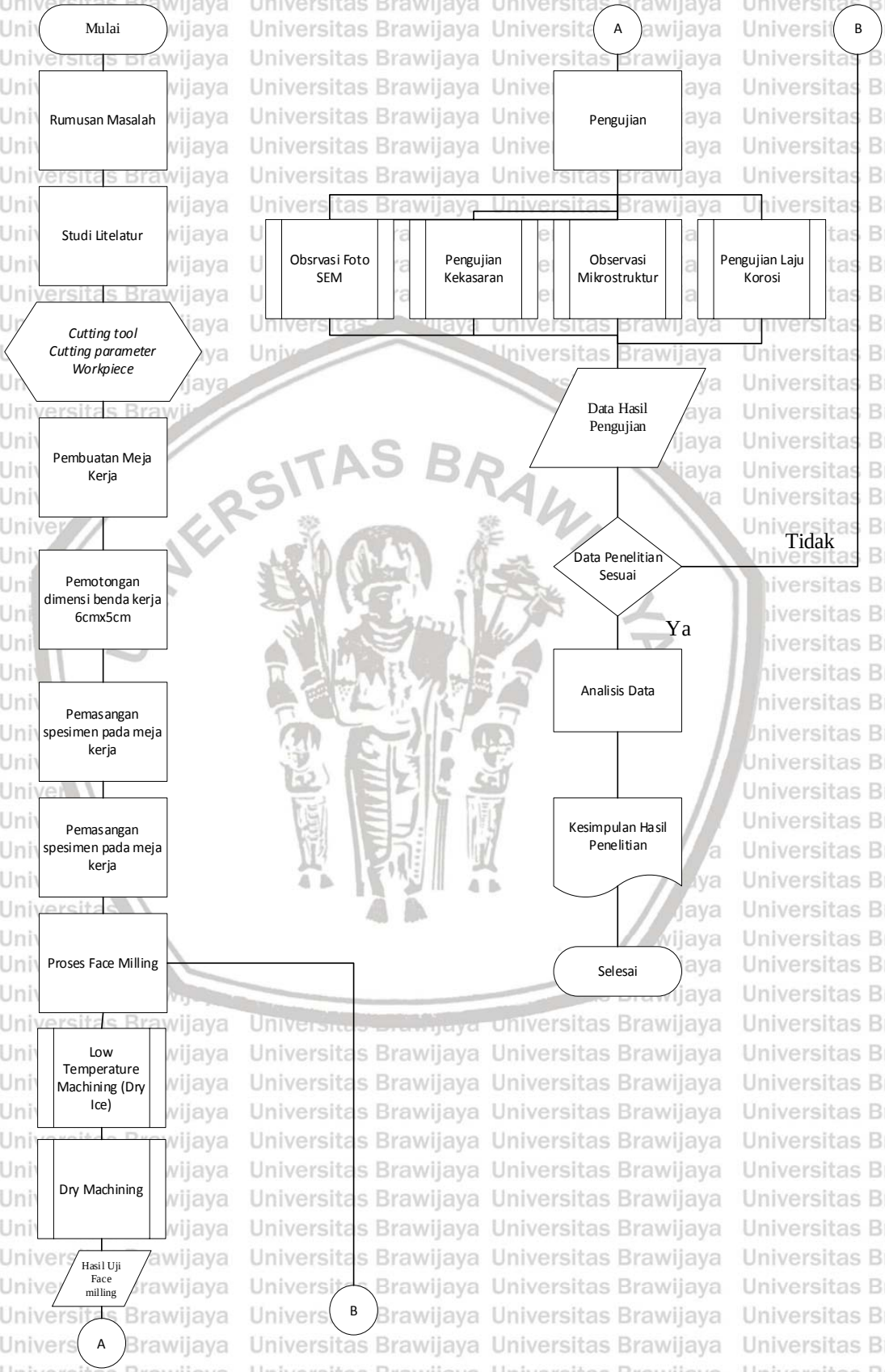
Gambar 3.15 Skema Penelitian

Keterangan:

1. Pahat *Carbide Square End Mill* 6mm
2. *Stainless Steel* 316L
3. Mesin CNC *Vertical Machining Center* HAAS VF-2
4. Wadah CO2 / *Aluminium Rectangular Tube*
5. *Thermogun*

3.9 Diagram Alir

Gambar 3.16 merupakan diagram alir dalam skripsi ini.



Gambar 3.16 Diagram alir penelitian

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Material *Stainless Steel* 316L

Setelah permesinan *face milling* dengan variasi *Spindle Speed* (RPM) pada masing-masing metode permesinan baik itu *Low Temperature Machining* maupun *Dry Machining* terhadap material *Stainless Steel* 316L, maka didapatkan hasil pengujian kekasaran permukaan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1
Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan *Stainless Steel* 316L

No	Metode Permesinan	*Spindle Speed* (RPM)	Nilai kekasaran Ra (µm)	Nilai kekasaran Ra Rata-Rata (µm)
1.1.a	*Low Temperature Machining*	1000	0,97	1,12
1.1.b			0,97	
1.1.c			1,42	
1.2.a		1250	0,62	0,83
1.2.b			0,84	
1.2.c			1,02	
1.3.a		1500	0,46	0,50
1.3.b			0,48	
1.3.c			0,55	
1.4.a		1750	0,24	0,29
1.4.b			0,31	
1.4.c			0,31	
1.5.a		2000	0,22	0,24
1.5.b			0,24	
1.5.c			0,26	
2.1.a	*Dry Machining*	1000	1,17	1,25
2.1.b			1,18	
2.1.c			1,39	
2.2.a		1250	0,93	1,15
2.2.b			1,23	
2.2.c			1,3	
2.3.a		1500	0,85	0,99
2.3.b			0,88	
2.3.c			1,23	
2.4.a		1750	0,37	0,42
2.4.b			0,4	
2.4.c			0,48	
2.5.a		2000	0,25	0,26
2.5.b			0,26	
2.5.c			0,28	

Selain hasil kekasaran permukaan, juga didapatkan hasil pengujian laju korosi dengan variasi *Spindle Speed* (RPM) dengan masing-masing metode permesinan baik itu *Low Temperature Machining* maupun *Dry Machining* terhadap material *Stainless Steel* 316L seperti Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2
Hasil Pengujian Laju Korosi pada *Stainless Steel* 316L

No	Metode Permesinan	*Spindle Speed* (RPM)	*Corrosion Rate* (mm/*year*)
1.1	*Low Temperature Machining*	1000	0,0304200
1.2		1250	0,0148090
1.3		1500	0,0066400
1.4		1750	0,0065500
1.5		2000	0,0003240
2.1	*Dry Machining*	1000	0,0388650
2.2		1250	0,0149410
2.3		1500	0,0142640
2.4		1750	0,0120600
2.5		2000	0,0019721

Selain hasil Laju korosi, juga didapatkan hasil perhitungan data temperatur terhadap waktu dengan variasi *Spindle Speed* (RPM) dengan masing-masing metode permesinan baik itu *Low Temperature Machining* maupun *Dry Machining* terhadap material *Stainless Steel* 316L seperti Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3
Perhitungan Temperatur Terhadap Waktu Pada *Stainless Steel* 316L

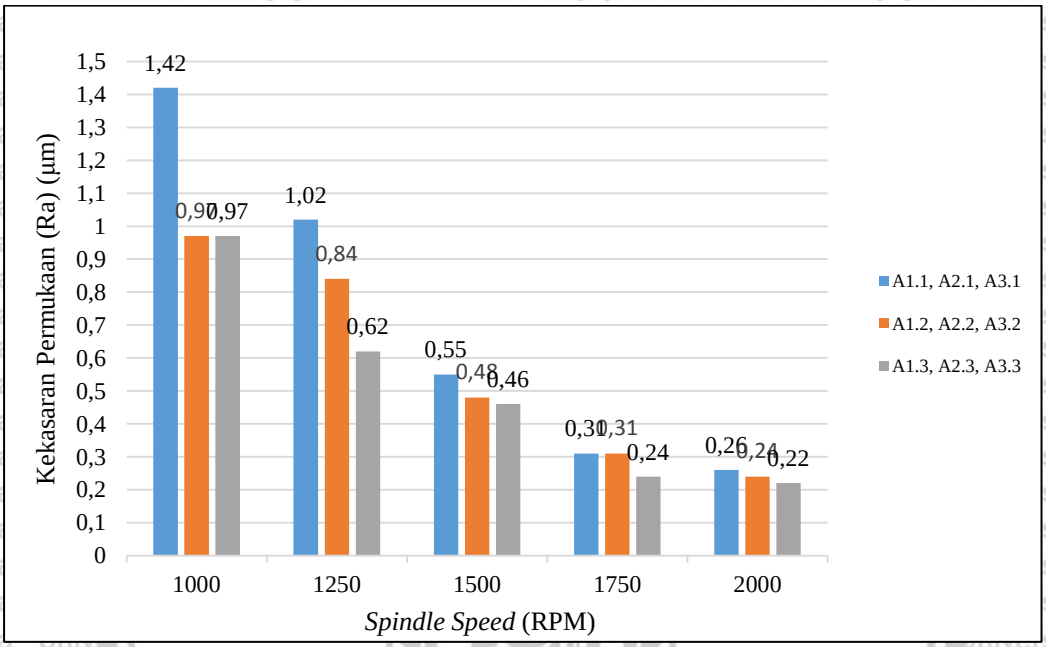
No	Metode Permesinan	*Spindle Speed* (RPM)	Temperatur Pemesinan (^{0}C)	Waktu saat Pemesinan (s)
1.1.a	Low Temperature Machining	1000	-12,6	0
1.1.b			-6,7	8,5
1.1.c			-5,4	17
1.1.d			-3,1	25,5
1.1.e			-1,2	34
1.2.a		1250	-25,4	0
1.2.b			-18,6	8,5
1.2.c			-15,5	17
1.2.d			-11,1	25,5
1.2.e			-5,3	34
1.3.a		1500	-23,3	0
1.3.b			-20,3	8,5
1.3.c			-19,5	17
1.3.d			-10,5	25,5
1.3.e			-7,7	34
1.4.a		1750	-29,7	0
1.4.b			-28,6	8,5

No	Metode Permesinan	*Spindle Speed* (RPM)	Temperatur Pemesinan (^{o}C)	Waktu saat Pemesinan (s)
1.4.c			-26,5	17
1.4.d			-23	25,5
1.4.e			-15,2	34
1.5.a			-30	0
1.5.b			-28	8,5
1.5.c		2000	-26,6	17
1.5.d			-21,9	25,5
1.5.e			-17,7	34
2.1.a			26,4	0
2.1.b			27,2	8,5
2.1.c		1000	30,4	17
2.1.d			36,4	25,5
2.1.e			39,9	34
2.2.a			26,9	0
2.2.b			30,5	8,5
2.2.c		1250	31,8	17
2.2.d			32,8	25,5
2.2.e			38,6	34
2.3.a			25,8	0
2.3.b			31,1	8,5
2.3.c	*Dry Machining*	1500	33,2	17
2.3.d			34,6	25,5
2.3.e			36,1	34
2.4.a			24	0
2.4.b			25,8	8,5
2.4.c		1750	28,6	17
2.4.d			32,2	25,5
2.4.e			35,5	34
2.5.a			23,2	0
2.5.b			24,6	8,5
2.5.c		2000	26,7	17
2.5.d			27,9	25,5
2.5.e			33,7	34

4.2 Data Hasil Pengolahan Grafik Kekasaran Permukaan dan Laju Korosi

4.2.1 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan (Ra) Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining*

Dari data hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.1 di atas, maka didapatkan grafik berupa pengaruh *Spindle Speed face milling* terhadap kekasaran permukaan (Ra) spesimen dengan menggunakan metode *low temperature machining* dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut:

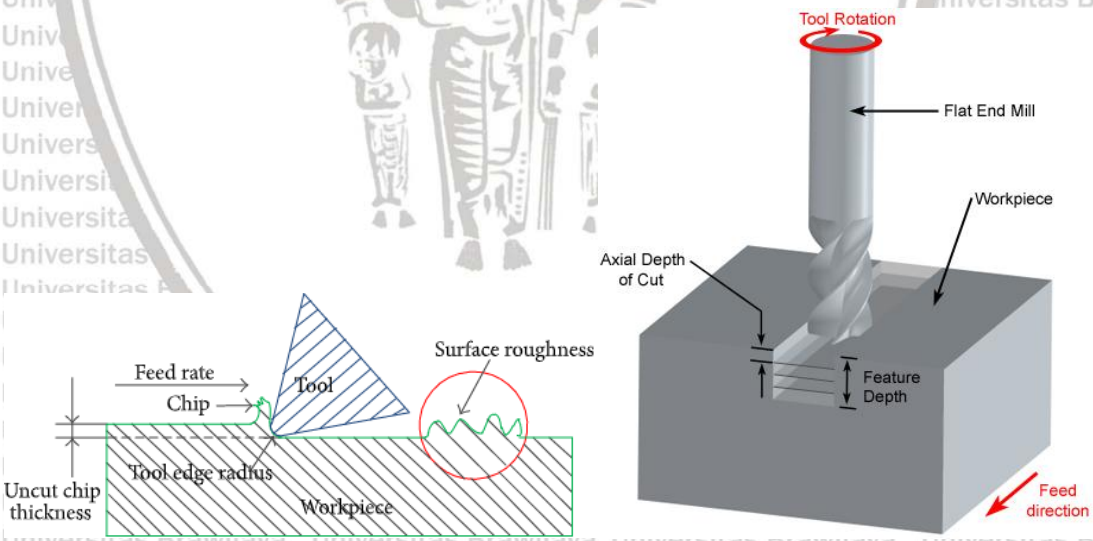


Gambar 4.1 Grafik pengaruh *spindle speed face milling* terhadap kekasaran permukaan spesimen (Ra) dengan metode *low temperature machining*

4.2.2 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Kekasaran Permukaan (Ra) Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining*

Gambar 4.1 merupakan grafik pengaruh *spindle speed face milling* terhadap kekasaran permukaan (Ra) spesimen *stainless steel* 316L dengan menggunakan metode *low temperature machining*. Pada masing-masing spesimen dilakukan proses *face milling* dengan variasi *spindle speed* yaitu: 1000 RPM; 1250 RPM; 1500 RPM; 1750 RPM; 2000 RPM. Setiap variasi *spindle speed* diambil tiga sampel untuk pengujian kekasaran permukaan. Dapat dilihat bahwa semakin meningkat nilai *spindle speed* yang digunakan sebagai parameter permesinan *face milling*, maka nilai kekasaran permukaan (Ra) yang dihasilkan semakin menurun. Nilai kekasaran permukaan (Ra) terendah didapatkan dari variasi *spindle speed* 2000 RPM, yaitu sebesar: 0,22 µm; 0,24 µm dan 0,26 µm. Dilanjutkan dengan variasi *spindle speed* 1750 RPM, yaitu sebesar: 0,24 µm; 0,31 µm dan

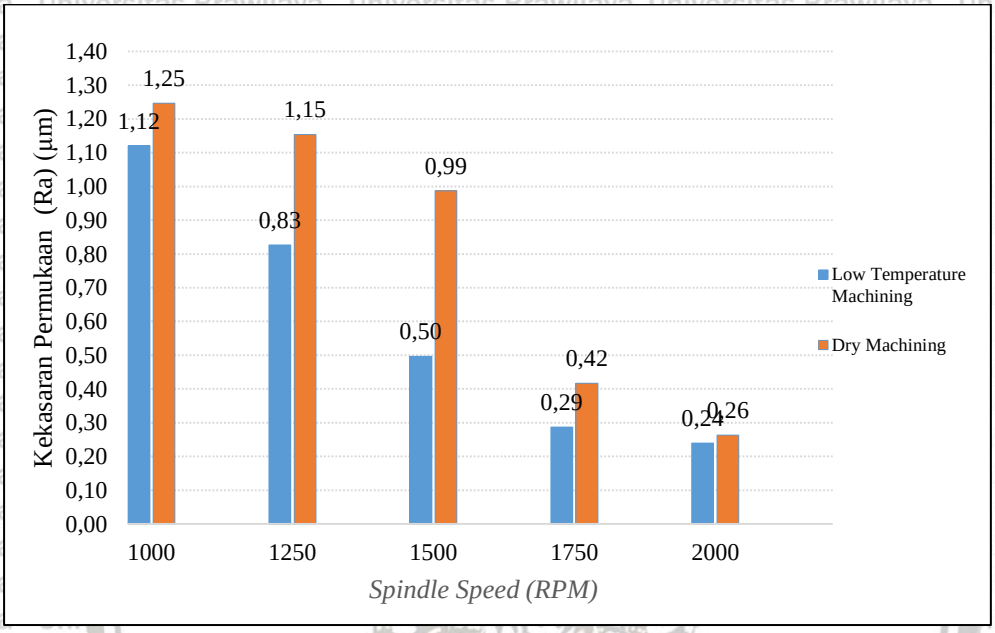
0,31 µm. Kemudian variasi *spindle speed* 1500 RPM, yaitu sebesar: 0,46 µm; 0,48 µm dan 0,55 µm. *Spindle speed* 1250 RPM, yaitu sebesar: 0,62 µm; 0,84 µm dan 1,02 µm. Dan pada urutan terakhir kekasaran permukaan (Ra) tertinggi didapatkan pada *spindle speed* 1000 RPM, yaitu sebesar: 0,97 µm; 0,97 µm dan 1,42 µm. Sehingga hasil pengujian ini sudah sesuai dengan dasar teori yang tercantum bahwa kekasaran permukaan terendah didapatkan oleh variasi *spindle speed* tertinggi (Abbas et al., 2016). Hal ini dikarenakan *spindle speed* berkecepatan tinggi mampu memutar lebih banyak per menitnya dan menyebabkan benda kerja tersayat lebih banyak pula dibandingkan dengan spindle speed berkecepatan rendah. Akibatnya benda kerja dengan *spindle speed* tertinggi menghasilkan kekasara permukaan (Ra) yang terendah begitu pula sebaliknya. Ketika putaran *spindle* meningkat, koefisien gesek antara benda kerja dan permukaan pahat mengalami penurunan, *chip* yang terbentuk pada proses *face milling* bersifat diskontinyu dan memiliki bidang kontak yang sedikit antara benda kerja dan permukaan pahat. Sehingga menghasilkan koefisian gesek yang lebih rendah dan kualitas permukaan yang lebih baik (Wang et al., 2014) . Maka hipotesis yang menyatakan bahwa nilai kekasaran permukaan pada *stainless steel* 316L menggunakan metode *low temperature* akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*, dalam penelitian ini dapat diterima dan ilustrasi proses *face milling* terhadap kekasaran dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Ilustrasi proses *face milling* terhadap kekasaran permukaan

4.2.3 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Rata − Rata Kekasaran Permukaan (Ra) pada Setiap Perlakuan Spesimen

Dari data hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.1 di atas, maka didapatkan grafik berupa pengaruh *spindle speed face milling* terhadap rata-rata kekasaran permukaan (Ra) setiap perlakuan yang diberikan kepada spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.3 di bawah ini:



Gambar 4.3 Grafik pengaruh *spindle speed face milling* terhadap rata-rata kekasaran permukaan (Ra) setiap perlakuan spesimen

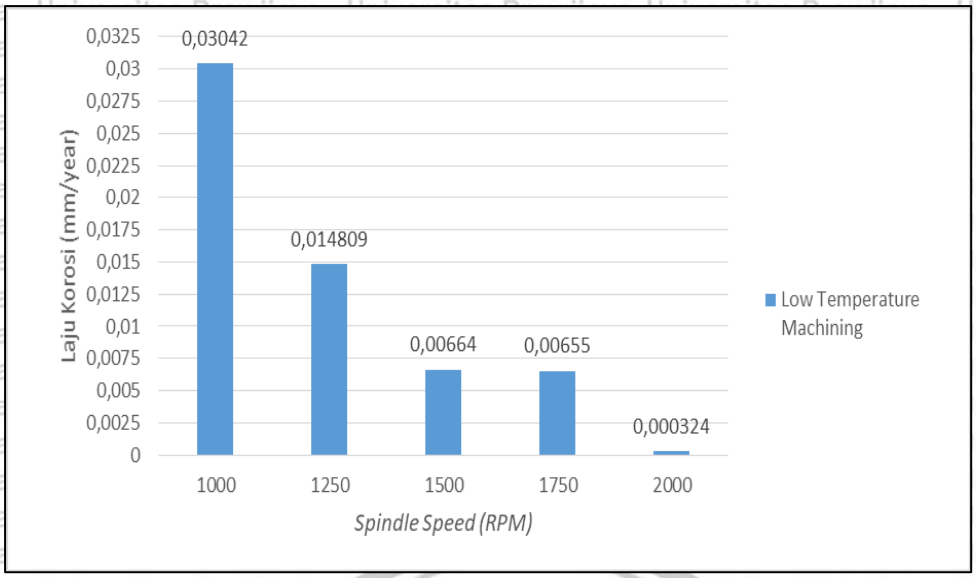
4.2.4 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Rata − Rata Kekasaran Permukaan (Ra) pada Setiap Perlakuan Spesimen

Gambar 4.3 merupakan grafik hubungan pengaruh variasi Spindle Speed terhadap rata-rata kekasaran permukaan (Ra) Pada setiap perlakuan spesimen stainless steel 316L. Adapun perlakuan yang diberikan selama proses pemesinan antara lain metode *low temperature* dan metode *dry* (tanpa pendinginan) pada masing-masing spesimen dilakukan proses *face milling* dengan variasi *spindle Speed* yaitu : 1000 RPM, 1250 RPM, 1500 RPM, 1750 RPM, dan 2000 RPM. Dari hasil proses milling kemudian diuji kekasaran permukaan (Ra) sebanyak dua sampel dan diambil nilai rata-ratanya. Dapat dilihat dari kedua perlakuan menghasilkan kecenderungan grafik yang sama, yaitu semakin meningkatnya Spindle speed maka nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra semakin menurun. untuk setiap variasi memberikan urutan nilai rata-rata permukaan Ra dari terendah hingga tertinggi yang selalu sama pada kedua perlakuan yaitu: pertama metode low temperature, Kedua metode *Dry* atau metode kering. Pada *spindle speed* 1000 RPM

nilai rata-rata kekasaran permukaan (Ra) dari terendah hingga tertinggi yaitu: : 1,12 µm; dan 1,25 µm. *Spindle speed* 1250 RPM, nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra dari terendah hingga tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,83 µm; 1,15 µm. *Spindle speed* 1500 RPM, nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra dari terendah hingga tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,50 µm; 0,99 µm. *Spindle speed* 1750 RPM, nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra dari terendah hingga tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,29 µm; 0,42 µm. Sedangkan *spindle speed* 2000 RPM, nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra dari terendah hingga tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,24 µm; 0,26 µm. Sehingga hasil dari pengujian ini sudah sesuai dengan dasar teori yang menyatakan bahwa pemberian pendinginan dapat mempengaruhi terhadap nilai rata-rata kekasaran permukaan (Ra) dibandingkan tanpa pendinginan atau metode (*dry*) (Shokrani et al., 2016). Hal ini dikarenakan dengan adanya *treatment* dari *dry ice* yang bertindak sebagai pendinginan membantu mengurangi panas hasil gesekan pada permesinan. Akibatnya ketika gaya gesek yang dihasilkan rendah, maka semakin rendah pula nilai kekasaran permukaannya (Ra). Metode *low temperature* dari *dry ice* memberikan konduksi dingin pada benda kerja dimana pada saat proses *face milling* panas hasil gesekan antara pahat (*tool*) dengan benda kerja dapat diminimalisir dengan adanya konduksi dari *dry ice* yang membuat benda kerja dikelilingi oleh bunga-bunga es kecil sehingga kekasaran permukaan dengan menggunakan metode *low temperature* lebih rendah dibandingkan dengan tanpa mengunakan perlakuan atau metode *dry* (Courbon et al., 2013). Maka hipotesis yang menyatakan bahwa nilai kekerasan permukaan pada *stainless steel* 316L menggunakan metode *low temperature* akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*, dalam penelitian ini dapat diterima.

4.2.5 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining*

Dari data hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.2 di atas, maka didapatkan grafik berupa pengaruh *spindle speed face milling* terhadap laju korosi spesimen dengan metode *low temperature machining* dapat dilihat pada Gambar 4.4 seperti di bawah ini:



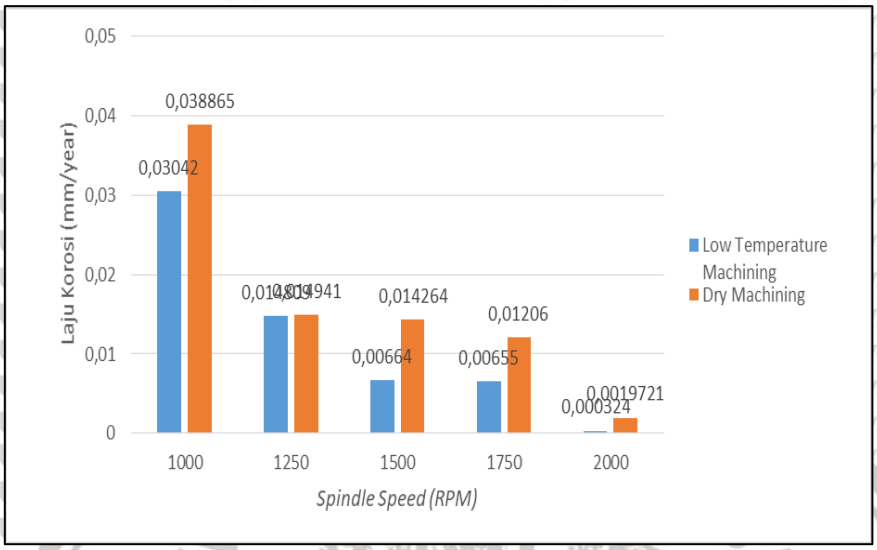
Gambar 4.4 Grafik pengaruh *spindle speed face milling* terhadap laju korosi spesimen dengan metode *low temperature machining*

4.2.6 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi Spesimen dengan Metode *Low Temperature Machining*

Gambar 4.4 merupakan grafik hubungan pengaruh variasi *spindle speed* terhadap laju korosi spesimen *stainless steel* 316L menggunakan metode *low temperature*. dapat dilihat bahwa semakin meningkat nilai *spindle speed* yang digunakan sebagai parameter permesinan *face milling*, maka nilai laju korosi yang dihasilkan semakin menurun. Nilai laju korosi tertinggi didapatkan dari variasi spindle speed terendah yaitu: 1000 RPM sebesar 0,03042 mm/year; 1250 RPM sebesar 0,014809 mm/year; 1500 RPM sebesar 0,00664 mm/year; 1750 RPM sebesar 0,00655 mm/year; 2000 RPM sebesar 0,000342 mm/year. Sehingga hasil pengujian ini sudah sesuai dengan dasar teori yang tercantum. Semakin tinggi nilai *spindle speed*, maka semakin rendah nilai kekasaran permukaan (Ra) yang dihasilkan. Ketika nilai kekasaran permukaan (Ra) semakin rendah, maka semakin rendah pula laju korosiya (Leon & Aghion, 2017), dapat dikatakan pula laju korosi material *stainless steel* 316L berbanding lurus dengan kekasaran permukaan (Ra). Hal ini dikarenakan kekasaran permukaan yang rendah memiliki sedikit tempat untuk pembentukan korosi pitting. Permukaan kasar akan membuat pembentukan korosi *pitting* dan mampu menjebak ion korosif, sehingga lebih banyak korosi pada batas butir yang terjadi (Alvarez et al., 2010). Maka hipotesis yang menyatakan bahwa semakin menurunnya nilai kekasaran permukaan *stainless steel* 316L menggunakan metode *low temperature* menyebabkan laju korosi juga semakin menurun, dalam penelitian ini dapat diterima.

4.2.7 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi pada Setiap Perlakuan Spesimen

Dari data hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.2 di atas, maka didapatkan grafik berupa pengaruh variasi *spindle speed* rata-rata laju korosi setiap perlakuan yang diberikan kepada spesimen *stainless steel* 316L dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik pengaruh *spindle speed* terhadap laju korosi setiap perlakuan spesimen

4.2.8 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Laju Korosi pada Setiap Perlakuan Spesimen

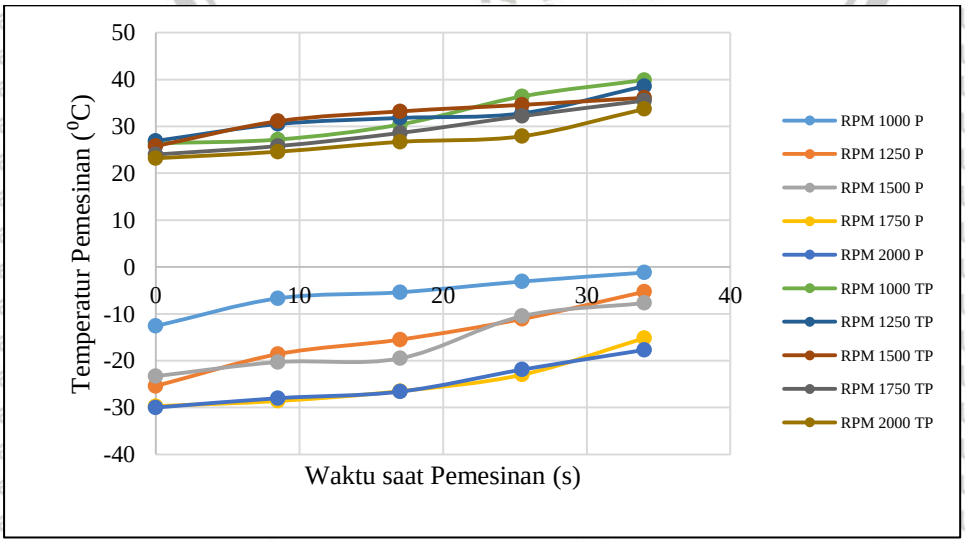
Gambar 4.5 adalah grafik hubungan pengaruh variasi *spindle speed* terhadap laju korosi pada setiap perlakuan benda kerja *stainless steel* 316L. Adapun perlakuan yang diberikan selama proses permesinan antara lain: metode *low temperature* dan tanpa perlakuan (metode *dry*). Dapat dilihat dari kedua perlakuan memberikan kecenderungan grafik yang sama yaitu semakin meningkat nilai *spindle speed*, maka nilai laju korosinya semakin rendah. Untuk setiap variasi *spindle speed* memberikan urutan nilai hasil uji korosi dari terendah hingga tertinggi yang selalu sama pada kedua perlakuan, yaitu: pertama menggunakan metode *low temperature* dan yang kedua tanpa menggunakan perlakuan (metode *dry*). Untuk *spindle speed* 1000 RPM, nilai laju korosi dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,03042 *mmpy*; 0,038865 *mmpy*. *Spindle speed* 1250 RPM, nilai laju korosi dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,014809 *mmpy*; 0,014941 *mmpy*; *Spindle speed* 1500 RPM, nilai laju korosi dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,00664 *mmpy*; 0,014264 *mmpy*. *Spindle speed* 1750 RPM, nilai laju korosi dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,00655 *mmpy*; 0,01206 *mmpy*. *Spindle speed* 2000 RPM, nilai laju korosi dari yang terendah ke

tertinggi yang dihasilkan yaitu: 0,000324 *mmpy*; 0,0019721 *mmpy*. Sehingga hasil pengujian ini sudah sesuai dengan dasar teori yang menyatakan bahwa pemberian pendinginan dapat mempengaruhi terhadap nilai kekasaran permukaan (Ra) dibandingkan dengan tanpa pendinginan atau metode (*Dry*). Pendinginan mampu menghasilkan kekasaran permukaan (Ra) yang rendah, maka laju korosi dari material *stainless steel* 316L yang dihasilkan juga semakin rendah (Hilbert et al., 2003). Karena nilai laju korosi material *stainless steel* 316L sebanding dengan nilai kekasaran permukaannya (Ra). Nilai laju korosinya menurun secara bertahap dalam larutan garam alkali dengan berkurangnya nilai kekasaran permukaan. Dalam penelitian ini, metode *low temperature* memberikan hasil laju korosi yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa perlakuan (metode *dry*). Hal ini sebanding dengan nilai kekasaran permukaan sebelumnya. Sehingga hasil penelitian ini dapat menunjukkan bahwa selain bersifat sebagai pendinginan, *low temperature* juga berpotensi tidak menghasilkan limbah minyak yang digunakan untuk pelumasan pada saat permesinan dan menurunkan laju korosi.

4.3 Data Hasil Pengolahan Grafik Pengaruh Spindle Speed Terhadap Temperatur Dan Waktu

4.3.1 Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* Terhadap Temperatur Dan Waktu Pemakanan Pada Stainless Steel 316L

Dari data hasil perhitungan yang tercantum pada Tabel 4.3 di atas, maka didapatkan grafik berupa pengaruh *spindle speed face milling* terhadap temperature dan waktu dengan metode *low temperature machining* dapat dilihat pada Gambar 4.6 seperti di bawah ini :



Gambar 4.6 Grafik pengaruh *spindle speed face milling* terhadap temperatur dan waktu pada *stainless Steel* 316L ; P = Perlakuan dan TP = Tanpa perlakuan

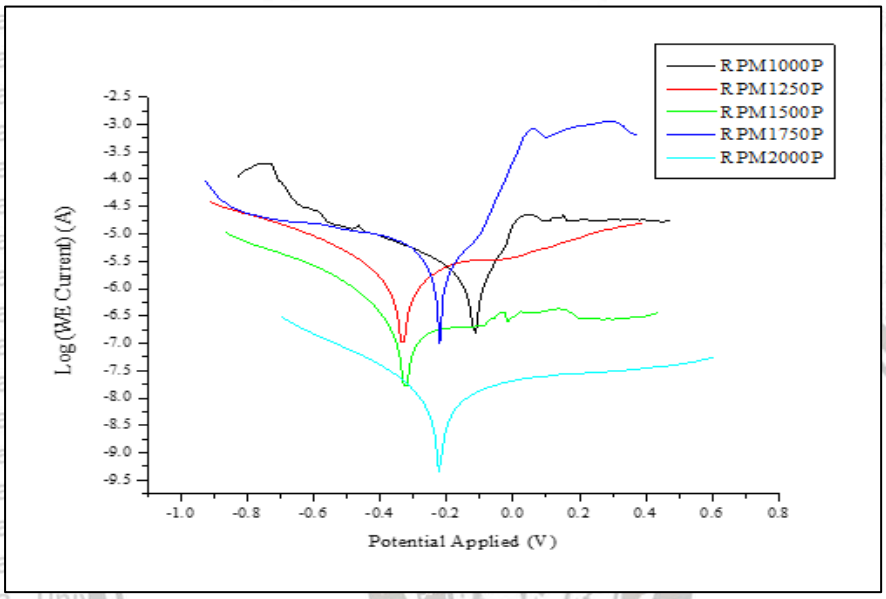
4.3.1 Analisis dan Pembahasan Grafik Pengaruh *Spindle Speed Face Milling* terhadap Temperatur dan Waktu Pada *Stainless Steel* 316L

Gambar 4.6 merupakan grafik hubungan pengaruh variasi *spindle speed* terhadap temperatur dan waktu pada setiap perlakuan benda kerja *stainless steel* 316L. Adapun perlakuan yang diberikan selama proses permesinan antara lain: metode *low temperature* dan tanpa perlakuan (metode *dry*). Pada masing-masing benda kerja dilakukan perhitungan dan diambil kenaikan *temperature* pada tiap masing-masing spesimen. Dapat dilihat dari kedua perlakuan memberikan kecenderungan grafik yang sama yaitu semakin meningkat nilai *spindle speed*, maka seiring dengan berjalannya waktu, temperatur pada saat permesinan akan naik. Untuk setiap variasi *spindle speed* memberikan urutan perubahan termperatur dari terendah hingga tertinggi yang selalu sama pada kedua perlakuan, yaitu: pertama menggunakan metode *low temperature* dan yang kedua tanpa menggunakan perlakuan (metode *dry*). Untuk *spindle speed* 1000 RPM, nilai perubahan temperatur dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: -1,2^{o}C; 39,9^{o}C. *Spindle speed* 1250 RPM, nilai perubahan temperatur dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: -5,3^{o}C; 38,6^{o}C. *Spindle speed* 1500 RPM, nilai perubahan temperatur dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: -7,7^{o}C; 36,1^{o}C. *Spindle speed* 1750 RPM, nilai perubahan temperatur dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: -23°C; 35,5^{o}C. *Spindle speed* 2000 RPM, nilai perubahan temperatur dari yang terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: -17,7^{o}C; 33,7^{o}C. Sehingga hasil perhitungan ini sudah sesuai dengan dasar teori yang menyatakan bahwa pada saat permesinan berlangsung akan meningkatkan temperatur akibat dari gesekan antara pahat dengan *stainless steel* 316L (Grossi et al., 2015). Dari grafik bisa kita lihat bahwa kenaikan temperatur tertinggi adalah metode (*dry*) dan kenaikan temperatur terendah adalah metode *low temperatur*. Ini dikarenakan pemberian pendinginan pada saat permesinan membuat panas akibat gesekan di sekitar pahat dan spesimen diserap oleh *dry ice* yang menyebabkan kenaikan temperatur pada saat permesinan rendah jika dibandingkan dengan metode *dry* (Jawahir et al., 2016). Akibatnya dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada RPM tertinggi tidak memberikan kenaikan yang tinggi pula, ini disebabkan karena bidang kontak pahat dengan spesimen lebih rendah dan benda kerja yang tersayat juga lebih banyak daripada *spindle speed* terendah sehingga koefisien gesek yang dihasilkan rendah pula.

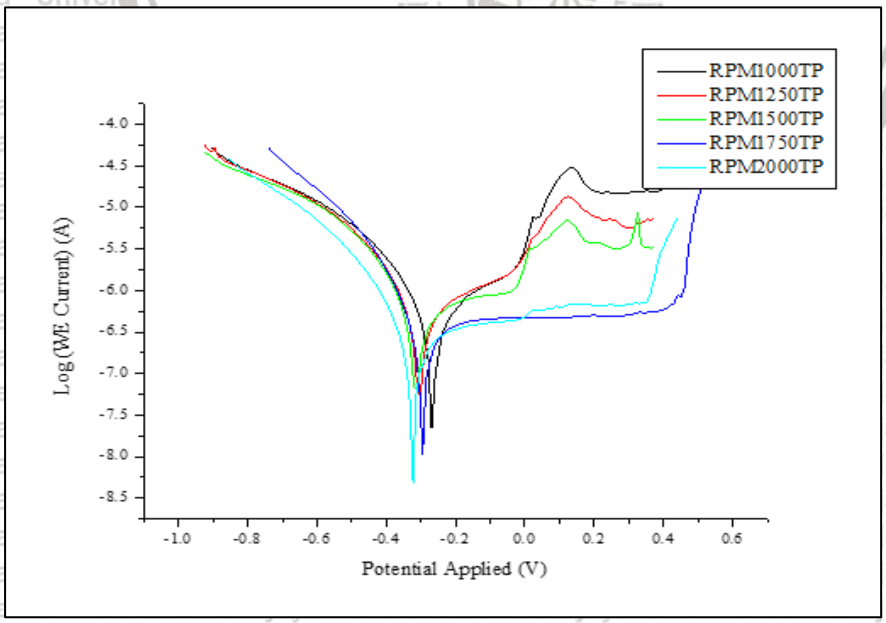
4.4 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Dari Pengujian Laju Korosi

4.4.1 Data Hasil Pengolahan Grafik Polarisasi Laju Korosi Setiap Perlakuan Dengan Variasi *Spindle Speed*

Pengujian laju korosi pada setiap spesimen dengan variasi *spindle speed* yang menggunakan 3 elektroda yaitu: *auxilary electrode, counter electrode, dan working electrode*. Maka didapatkan hasil grafik polarisasinya dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Grafik polarisasi laju korosi variasi spindle speed dengan metode *low* temperatur ; P = Perlakuan



Gambar 4.8 Grafik polarisasi laju korosi variasi *spindle speed* dengan metode *dry* ; TP = Tanpa Perlakuan

4.4.2 Analisis Grafik Polarisasi Laju Korosi Pada Setiap Perlakuan Dengan Variasi *Spindle Speed*

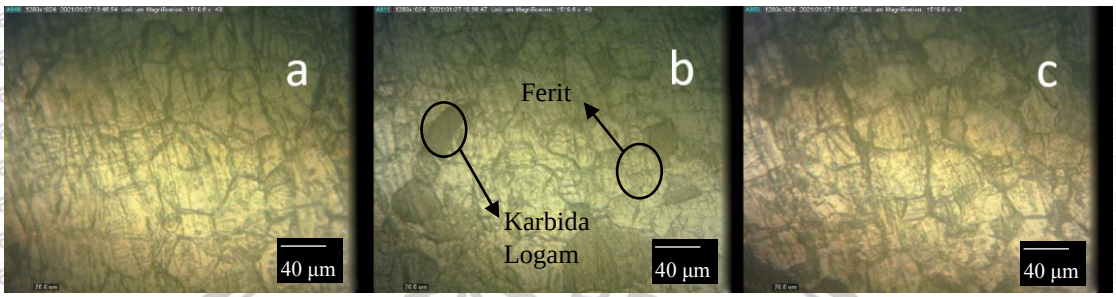
Gambar diatas adalah gambar grafik polarisasi laju korosi setiap perlakuan spesimen dengan variasi *spindle speed*. Polarisasi adalah salah satu bentuk reaksi korosi yang merupakan penyebab timbulnya karat pada kerusakan logam. Secara definitif polarisasi itu adalah proses pengutuban ion hidrogen secara kimia listrik sehingga terbentuk gas hidrogen dengan bantuan pengikatan elektron yang dihasilkan dari proses degradasi logam (Cicek, 2014). Pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 dapat kita lihat bahwa grafik polarisasi terbagi menjadi 3 bagian daerah potensial yang ditampilkan dalam grafik tersebut. Pada daerah A-B adalah daerah terjadinya reaksi katodik, dimana reaksi yang terjadi tidak berpengaruh pada material yang diberikan reaksi dan daerah A-B merupakan daerah aktif. Pada daerah B-C memperlihatkan bahwa titik B merupakan titik puncak atau potensial korosi bebas pada keseimbangan reaksi anodik dan katodik, pada titik C terjadi reaksi anodik yang menyebabkan material tersebut pada lapisan pasif dan material mulai terlarut dalam larutan HBSS atau mulai terjadinya pembentukan korosi. Pada daerah C-D memperlihatkan bahwa pada titik D menunjukkan lapisan pasif dari material telah terlarut/rusak dan material terkorosi secara bebas. Daerah D-E memperlihatan bahwa material telah terkorosi secara bebas dan grafik cenderung ke kanan dikarenakan kerapatan arus naik seiring dengan banyaknya jumlah korosi pada material yang terjadi, D-E disebut dengan daerah transpasif. Pada grafik nilai Icorr perluasan area dari tiap masing-masing variasi *spindle speed* diurutkan dari terendah ke tertinggi yang dihasilkan yaitu: *Spindle Speed* 2000 RPM 3,38E-08 µA/cm²; 2,06E-07 µA/cm². *Spindle Speed* 1750 RPM 6,84E-07 µA/cm²; 1,26E-06 µA/cm². *Spindle Speed* 1500 RPM 6,93E-07 µA/cm²; 1,49E-06 µA/cm². *Spindle Speed* 1250 RPM 1,55E-06 µA/cm²; 1,56E-06 µA/cm². *Spindle Speed* 1000 RPM 3,18E-06 µA/cm²; 4,06E-06 µA/cm².

Gambar 4.7 dan gambar 4.8 diatas menunjukkan bahwa potensial korosi dengan metode *low temperatur* cenderung bergeser ke arah kanan dibandingkan metode *dry*. Sehingga semakin tinggi nilai *spindle speed,* maka semakin rendah nilai Icorr nya. Hal ini sudah sesuai dengan dasar teori dimana semakin rendah nilai Icorr maka semakin rendah pula laju korosinya karena laju korosi dan nilai Icorr berbanding lurus. (ganash, 2014,p.4008).

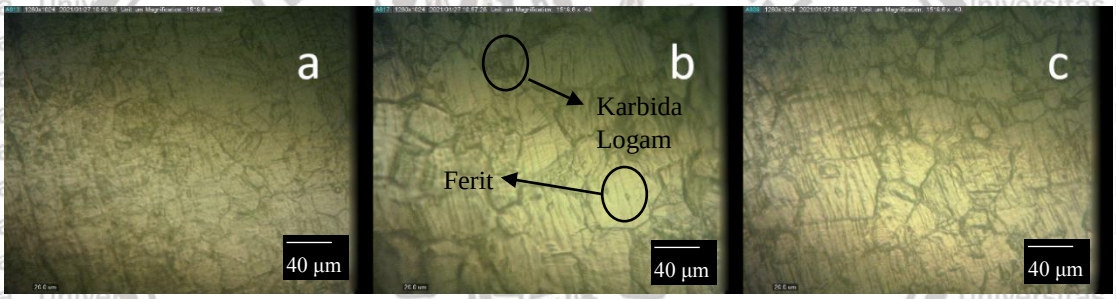
4.5 Data Hasil Pengujian Foto Mikrostruktur

4.5.1 Gambar Hasil Foto Mikrostruktur Pada Spesimen Dengan Variabel *Spindle* Speed Menggunakan Metode Low Temperatur dan Metode *Dry*

Dari pengujian hasil foto Mikrostruktur yang diambil 3 sampel dari variasi spindle speed 1000 RPM, 1500 RPM, dan 2000 RPM dengan menggunakan perbesaran 1500x pada stainless steel 316L menggunakan metode *low temperatur* dan metode *dry* pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 didapatkan foto seperti berikut:



Gambar 4.9 Hasil uji foto mikrostruktur dengan variasi *spindle speed* menggunakan metode *low temperature* (a) 1000 RPM (b) 1500 RPM dan (C) 2000 RPM



Gambar 4.10 Hasil uji foto mikrostruktur dengan variasi *spindle speed* menggunakan metode *dry* (a) 1000 RPM (b) 1500 RPM dan (C) 2000 RPM

4.5.2 Analisis Hasil Foto Mikrostruktur Pada Spesimen Dengan Variabel *Spindle Speed* Menggunakan Metode *Low Temperatur* dan Metode *Dry*

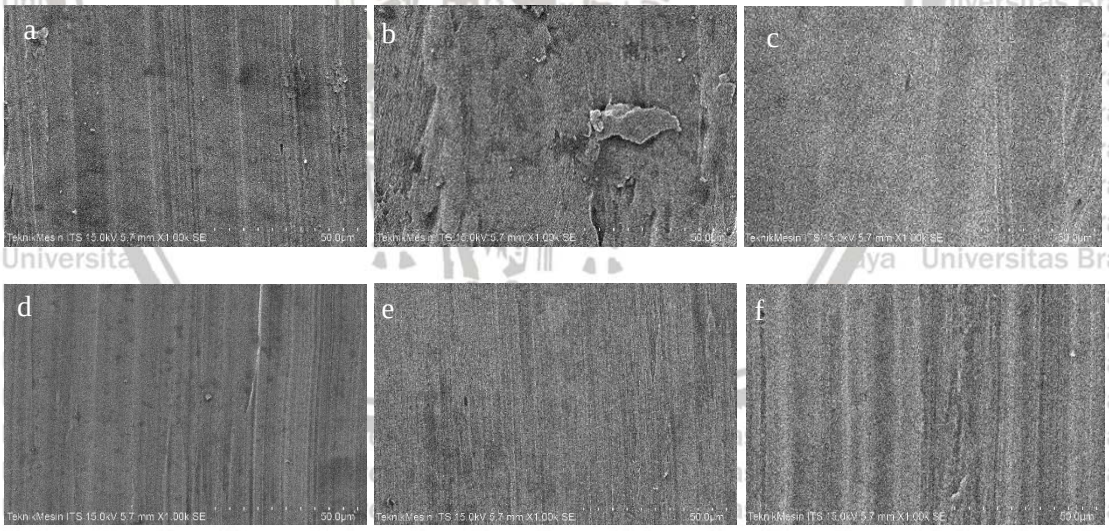
Dari Gambar 4.9 ditunjukkan hasil foto mikrostruktur perbesaran 1500x menggunakan perlakuan pendinginan dengan metode *low temperatur* dan Gambar 4.10 ditunjukkan hasil foto miskrostruktur perbesaran 1500x menggunakan tanpa perlakuan dengan metode *dry*. Variasi yang diambil untuk mewakili sampel dari hasil uji foto mikrostruktur yaitu spindle speed 1000 RPM, 15000 RPM, dan 2000 RPM dari masing-masing perlakuan. Pada gambar dihitung nilai diameter rata-rata yang menggunakan *software* (imagej) dari tiap masing-masing variasi spindle speed diurutkan dari terendah ke tertinggi dari masing-masing perlakuan *low temperatur* dan metode *dry* yang dihasilkan yaitu: pada *spindle speed* 2000 RPM nilai diameter rata-ratanya 28,8 µm dan 30,9. *Spindle*

speed 1500 RPM nilai diameter rata-ratanya 31,1 µm dan 33,1. *Spindle speed* 1000 RPM nilai diameter rata-ratanya 33,4 µm dan 34,3. Dari perhitungan dapat kita lihat bahwa dengan menggunakan metode *low temperatur* akan membuat butiran akan semakin kecil daripada metode dry (Prieto et al., 2014). Pada metode *dry* memiliki butiran yang lebih besar dibandingkan dengan perlakuan pendinginan *low temperatur*, hal ini diakibatkan karena metode *dry* pada saat permesinan panas yang dihasilkan lebih besar sehingga butir membesar dan memiliki ukuran yang lebih besar. Hal ini berhubungan dengan semakin kecil ukuran butir maka laju korosi akan semakin rendah, ini dikarenakan semakin kecil ukuran pada butiran maka nilai Icorr-nya akan semakin rendah pula (Ralston et al., 2010).

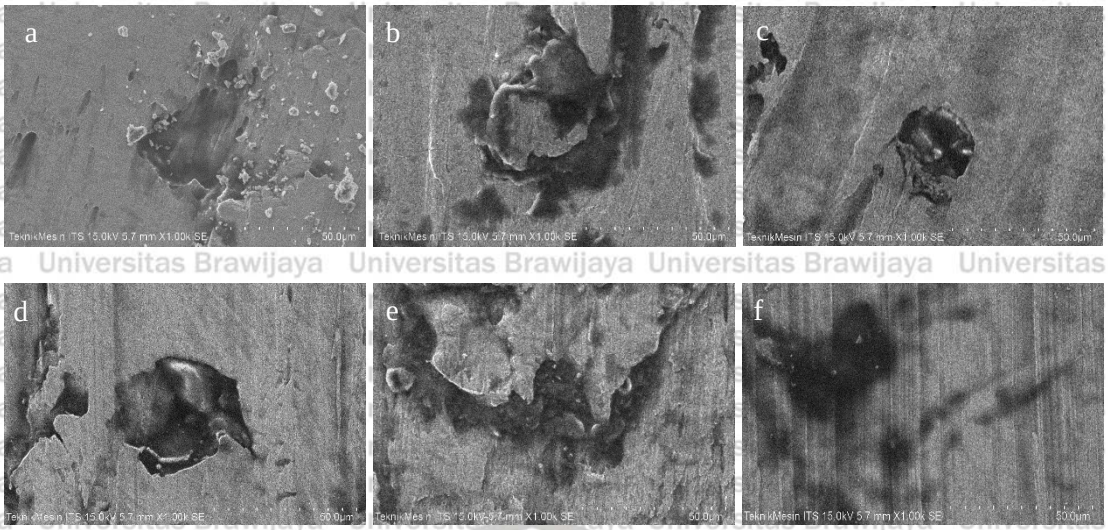
4.6 Data Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope*

4.6.1 Gambar Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope*

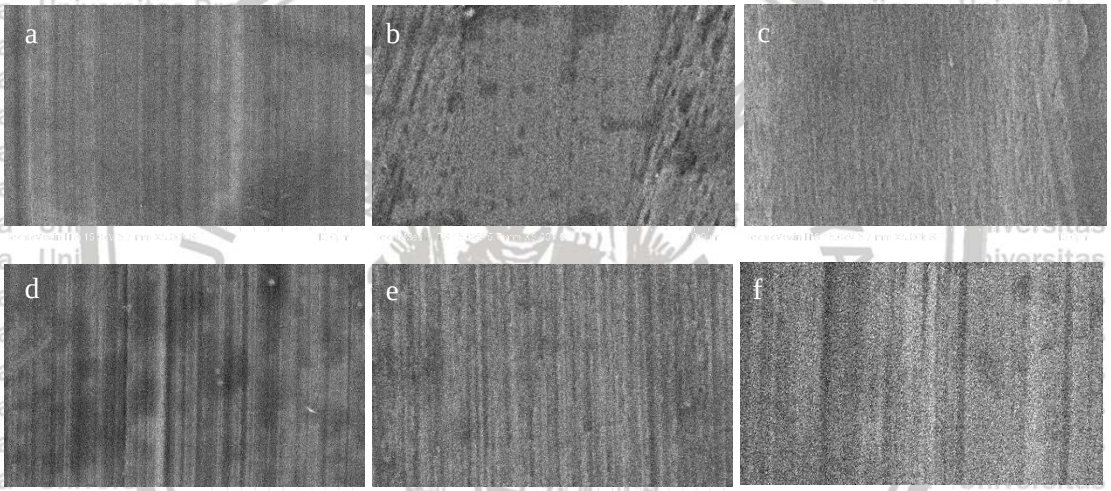
Dari pengujian hasil foto *Scanning Electron Microscope* yang diambil 3 sampel dari variasi *spindle speed* 1000 RPM, 1500 RPM, dan 2000 RPM dengan menggunakan perbesaran 1000x dan 5000x pada *stainless steel* 316L menggunakan metode *low temperatur* pada dan metode *dry*, pada gambar 4.11 dan gambar 4.13 sebelum korosi , pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.14 sesudah korosi didapatkan foto seperti berikut:



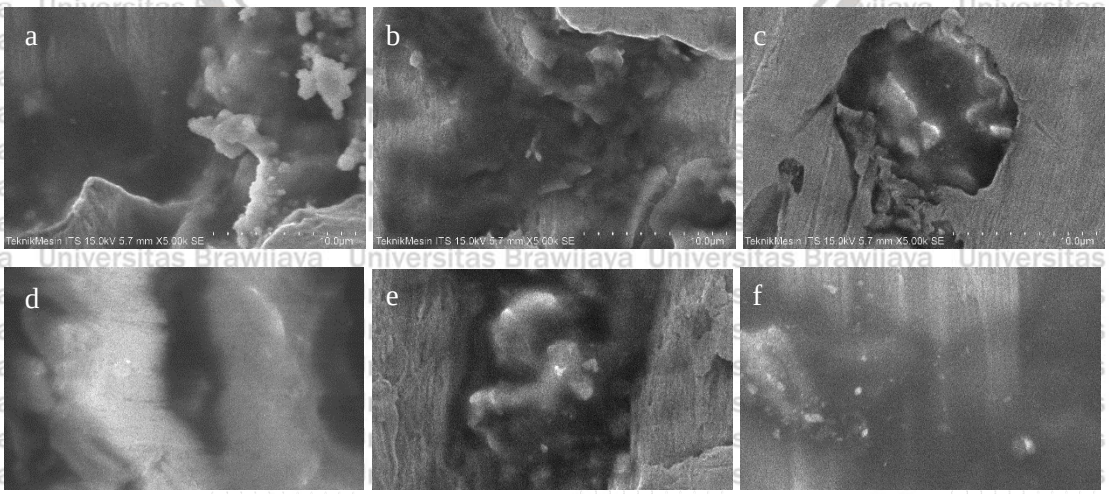
Gambar 4.11 Hasil uji foto *scanning electron microscope* variasi *spindle speed* 1000 RPM (a,d); 1500 RPM (b,e); dan 2000 RPM (c,f) menggunakan metode *low temperature* (a,b,c) dan metode *dry* (d,e,f) dengan perbesaran 1000x sebelum korosi



Gambar 4.12 Hasil uji foto *scanning electron microscope* variasi *spindle speed* 1000 RPM (a,d); 1500 RPM (b,e); dan 2000 RPM (c,f) menggunakan metode *low temperature* (a,b,c) dan metode *dry* (d,e,f) dengan perbesaran 1000x setelah korosi



Gambar 4.12 Hasil uji foto *scanning electron microscope* variasi *spindle speed* 1000 RPM (a,d); 1500 RPM (b,e); dan 2000 RPM (c,f) menggunakan metode *low temperature* (a,b,c) dan metode *dry* (d,e,f) dengan perbesaran 5000x sebelum korosi



Gambar 4.14 Hasil uji foto *scanning electron microscope* variasi *spindle speed* 1000 RPM (a,d); 1500 RPM (b,e); dan 2000 RPM (c,f) menggunakan metode *low temperature* (a,b,c) dan metode *dry* (d,e,f) dengan perbesaran 5000x setelah korosi

4.6.2 Analisis Gambar Hasil Pengujian Foto *Scanning Electron Microscope*

Dari hasil pengujian foto *scanning electron microscope* dapat kita lihat bahwa pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 bentuk sayatan hasil pemotongan menggunakan *face milling* terlihat spesimen yang menggunakan metode *low temperature* lebih baik daripada menggunakan metode *dry*. bentuk dari hasil pemakanan pada metode *dry* tren yang terjadi adalah goresannya lebih besar dan alur nya tidak beraturan daripada metode *low temperature.* Ini dikarenakan panas yang dihasilkan dari *low temperature* sedikit dibandingkan dengan panas yg dihasilkan dari metode *dry.*

Dari Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 diatas terlihat juga perbedaan setelah dilakukan uji korosi. Hal tersebut terlihat dengan bentuk lubang berongga yang terjadi di setiap variasi dan di setiap perlakuan pada spesimen uji korosi. Bentuk korosi tersebut memiliki ukuran yang berbeda disetiap perlakuan dan variasinya. Korosi yang terjadi pada uji korosi adalah korosi pitting, luasan korosi pitting akan meningkat seiring dengan meningkatnya kekasaran permukaan (Ma, 2012). Ini bisa terjadi karena lubang tersebut yang menyebabkan terjadinya korosi pada permukaan spesimen.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat disimpulakn bahwa variasi *spindle speed* berpengaruh terhadap hasil kekasaran permukaan (Ra) pada permesinan *face milling stainless steel* 316L. Semakin tinggi nilai *spindle speed*, maka nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun. Pada saat spindle speed meningkat, terjadi penurunan koefisien gesekan antara permukaan pahat dengan benda kerja. Sehingga yang terjadi koefisien gesek yang rendah dan kualitas dari permukaan akan meningkat. Begitu juga dengan nilai kekasaran permukaan (Ra) berbanding lurus dengan nilai laju korosinya, hal ini bisa terjadi karena kekasaran permukaan yang lebih rendah mempunyai tempat yang sedikit untuk pembentukan korosi pitting, Permukaan kasar akan membuat pembentukan korosi *pitting* dan mampu menjebak ion korosif, sehingga lebih banyak korosi pada permukaan yang terjadi. Metode *low temperature* mempunyai nilai kekasaran yang lebih rendah dan laju korosi yang lebih rendah pula. Ini disebabkan karena sifat pada pendinginan berfungsi untuk mengurangi panas hasil gesek yang terjadi antara pahat dengan benda kerja, *low temperature* membuat spesimen diberikan treatment pendinginan dengan menggunakan *dry ice* yang menyebabkan kekasaran permukaan (Ra) rendah juga laju korosi yang rendah. Selain itu penggunaan pendinginan tidak menghasilkan limbah minyak seperti *coolant* dan mengurangi limbah yang dapat berdampak pada lingkungan. Dari perhitungan hasil uji mikrostruktur dapat dilihat bahwa menggunakan metode *low temperature* akan menyebababkan ukuran butiran semakin kecil daripada metode *dry*. semakin kecil ukuran butiran maka nilai Icorr akan semakin rendah pula, hal ini menyebabkan laju korosi dengan menggunakan metode *low temerature* akan semakin rendah pula.

5.2 Saran

1. Diharapkan dapat melakukan penelitian lebih lanjut tentang face milling menggunakan metode *cryogenic* dengan *liquid* nitrogen.
2. Dapat melakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui perbandingan liquid nitrogen dengan *dry ice*.

3. Diharapkan mempunyai ide baru tentang implan dari tubuh manusia dan inovasi tentang meminimumkan laju korosi yang bisa menyebabkan infeksi pada tubuh.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A. T., Ragab, A. E., Al Bahkali, E. A., & El Danaf, E. A. 2016. Optimizing Cutting Conditions for Minimum Surface Roughness in Face Milling of High Strength Steel Using Carbide Inserts. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2016*. https://doi.org/10.1155/2016/7372132.

Alvarez, R. B., Martin, H. J., Horstemeyer, M. F., Chandler, M. Q., Williams, N., Wang, P. T., & Ruiz, A. 2010. Corrosion relationships as a function of time and surface roughness on a structural AE44 magnesium alloy. *Corrosion Science*, *52*(5), 1635–1648. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.01.018.

Austin, A. L., & Parker, R. 1967. Determining the dynamic elastic modulus at elevated temperatures by using rapid heating techniques. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. https://doi.org/10.1115/1.3609535.

Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. Sen. 2008. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review. In *Advances in Colloid and Interface Science*. https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.12.008.

Boothroyd, C. B., Baxter, C. S., Bithell, E. G., Hÿtch, M. J., Ross, F. M., Sato, K., & Stobbs, W. M. 1989. The determination of the structure and composition at interfaces to atomic resolution. *Ultramicroscopy*. https://doi.org/10.1016/0304-3991(89)90227-1.

Chad Bolding, M., Barrett, S. M., Munsell, J. F., & Groover, M. C. 2010. Characteristics of Virginia's logging businesses in a changing timber market. *Forest Products Journal*. https://doi.org/10.13073/0015-7473-60.1.86.

Cicek, V. 2014. Corrosion Engineering. In *Corrosion Engineering*. https://doi.org/10.1002/9781118720837.

Courbon, C., Pusavec, F., Dumont, F., Rech, J., & Kopac, J. 2013. Tribological behaviour of Ti6Al4V and Inconel718 under dry and cryogenic conditions - Application to the context of machining with carbide tools. *Tribology International*. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.010.

Davim, J. P. 2011. Machining of hard materials. In *Machining of Hard Materials*. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-450-0.

Eksioglu, C., Kilic, Z. M., & Altintas, Y. 2012. Discrete-time prediction of chatter stability, cutting forces, and surface location errors in flexible milling systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. https://doi.org/10.1115/1.4007622.

Eldesouky, I., Abdelaal, O., & El-Hofy, H. 2014. Femoral hip stem with additively manufactured cellular structures. *IECBES 2014, Conference Proceedings - 2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences: "Miri, Where Engineering in Medicine and Biology and Humanity Meet."* https://doi.org/10.1109/IECBES.2014.7047482.

Grossi, N., Sallese, L., Scippa, A., & Campatelli, G. 2015. Speed-varying cutting force coefficient identification in milling. *Precision Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.04.006.

Hilbert, L. R., Bagge-Ravn, D., Kold, J., & Gram, L. 2003. Influence of surface roughness of stainless steel on microbial adhesion and corrosion resistance. *International Biodeterioration and Biodegradation*. https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00104-5.

Hong, C. S., Tao, N. R., Lu, K., & Huang, X. 2009. Grain orientation dependence of deformation twinning in pure Cu subjected to dynamic plastic deformation. *Scripta Materialia*. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.04.006.

Jawahir, I. S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, J., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S. T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schulze, V., & Umbrello, D. 2016. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007.

Larché, N., Diler, E., & Thierry, D. 2019. Crevice and pitting corrosion of stainless-steel and nickel based alloys in deep sea water. *NACE - International Corrosion Conference Series*.

Leon, A., & Aghion, E. 2017. Effect of surface roughness on corrosion fatigue performance of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM). *Materials Characterization*. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.029.

Ma, F.-Y. 2012. Corrosive Effects of Chlorides on Metals. In *Pitting Corrosion*. https://doi.org/10.5772/32333.

Manivasagam, G., Dhinasekaran, D., & Rajamanickam, A. 2010. Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review~!2009-12-22~!2010-01-20~!2010-05-25~! *Recent Patents on Corrosion Science*. https://doi.org/10.2174/1877610801002010040.

McCafferty, E. 2010. Introduction to corrosion science. In *Introduction to Corrosion Science*. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3.

Nalbant, M., & Yildiz, Y. 2011. Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *21*(1), 72–79. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60680-8.

Prieto, G., Ipiña, J. E. P., & Tuckart, W. R. 2014. Cryogenic treatments on AISI 420 stainless steel: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.059.

Rahdiyanta, D., Prasetya, H. T., & Rezani, R. 2020. Development of interactive learning media in producing straight gears of milling subjects. *Journal of Physics: Conference Series*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012011.

Ralston, K. D., Birbilis, N., & Davies, C. H. J. 2010. Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals. *Scripta Materialia*. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.035.

Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. 2016. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.002.

Velev, O. D., & Gupta, S. 2009. Materials fabricated by micro- and nanoparticle assembly - The challenging path from science to engineering. *Advanced Materials*. https://doi.org/10.1002/adma.200801837.

Wang, M., Gao, L., & Zheng, Y. 2014. An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *78*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.10.008.

Zhang, S. S., Jiang, C. Y., Wu, J. Q., Liu, X. G., Li, Q., Huang, Z. S., Li, D., & Wang, H. 2015. Wang, et al. 2015. *Chemical Communications*.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

Halaman ini sengaja dikosongkan

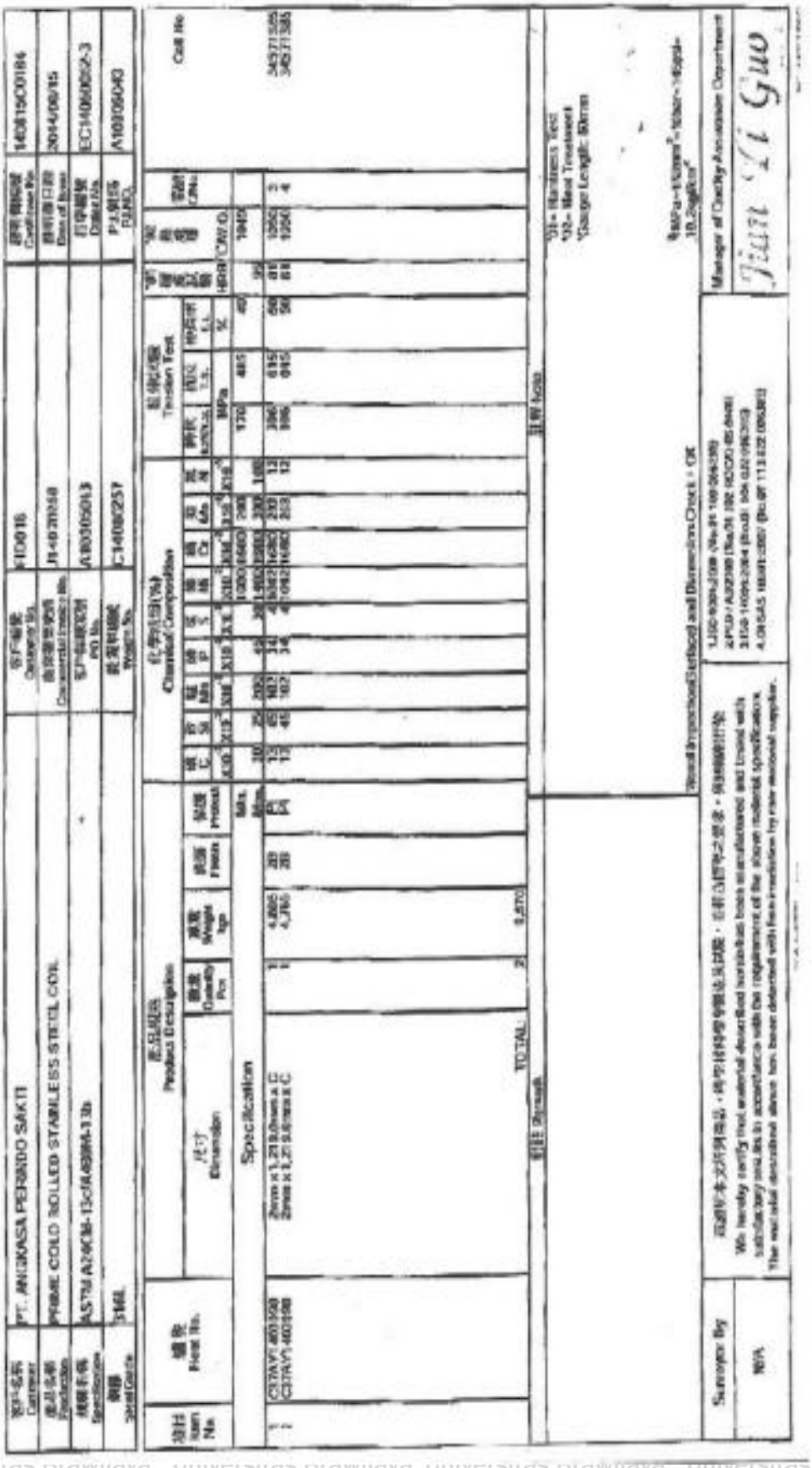
Lampiran 1 *Datasheet Standard Milling Condition* Untuk Pahat NACHI

NACHI
Standard Milling Condition

2VG / VG MILL Two Flutes

	Work Material	Carbon Steels, Cast Irons (150 ~ 250 HB)		Alloy Steels, Pre-hardened Steels (25 ~ 35 HRC)		Hardened Steels (35 ~ 45 HRC)		Hardened Steels (45 ~ 55 HRC)		Stainless Steels (SUS304, 316)		Aluminum Alloys, Titanium Alloys	
	Milling Conditions / Dia. of Mill mm	Rotation min⁻¹	Feed mm/min	Rotation min⁻¹	Feed mm/min	Rotation min⁻¹	Feed mm/min	Rotation min⁻¹	Feed mm/min	Rotation min⁻¹	Feed mm/min	Rotation min⁻¹	Feed mm/min
Conventional Milling	2	11200	340	10900	240	7300	120	5200	80	5300	90	3300	50
	4	6400	460	6000	320	4200	180	3000	110	3000	130	1900	70
	6	4600	550	4300	360	3000	210	2200	130	2200	150	1400	80
	8	3400	650	3200	390	2200	210	1600	130	1600	150	1000	80
	10	2800	560	2600	360	1800	210	1300	130	1300	150	800	90
	12	2300	560	2200	400	1500	210	1100	130	1100	150	700	80
	16	1700	450	1600	320	1100	180	800	100	800	110	500	60
	20	1350	380	1300	280	900	160	650	90	650	100	400	50
Side Milling	ap	1.5D						1D		1.5D		1D	
	ae	0.1D			0.05D			0.02D		0.1D		0.05D	
Grooving	ap	0.5D			0.3D			0.05D		0.5D		0.05D	

Lampiran 2 *Datasheet* Komposisi Material *Stainless Steel* 316L



repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

Lampiran 3 *Datasheet Dry Ice* / Solid CO_2

Material Safety Data Sheet
Dry Ice

Identity: Carbon Dioxide – Solid

General Information

Date MSDS Prepared: May 13, 2009
Safety Data Review Date: May 13, 2012
Company Identification:
Continental Carbonic Products, Inc.
3985 East Harrison Avenue
Decatur, IL 62526
800-DRY ICE2

Haz Mat Identification System
H 1
F 0
R 1
PPE B

Ingredients/Identity Information

CAS#	Chemical Name	Percent	EINECS/ELINCS
124-38-9	Carbon Dioxide	100	

Proprietary: No
NIOSH (RTECS) Number: FF6400000
Exposure Limits:
Carbon Dioxide:

5000	**ppm**	**(9000 mg/m3)**	**OSHA**	**TWA**
5000	**ppm**	**(9000 mg/m3)**	**ACGIH**	**TWA: 30,000 ppm (54,000 mg/me) ACGIH STREL**
5000	**ppm**	**(9000 mg/m3)**	**NIOSH**	**recommended 10 hour TWA:**
30,000	**ppm**	**(54,000 mg/m3)**	**NIOSH**	**recommended STEL**
5000	**ppm**	**(9000 mg/m3)**	**DFG MAK**	**TWA:**
10,000	**ppm**	**(18,000 mg/m3)**	**DFG MAK**	**60 minute peak, momentary value**

Measurement method: Gas collection bag: Gas chromatography with thermal conductivity
Detector: (NIOSH III #S2491)

Physical/Chemical Characteristics

Appearance and Odor: colorless, odorless to slightly pungent
Boiling Point: -109.4 F
Melting Point: -109.3 F
Vapor Pressure (MM hg/70F): 831 PSIA
Solubility In Water: APPRECIABLE

Fire Fighting Measures

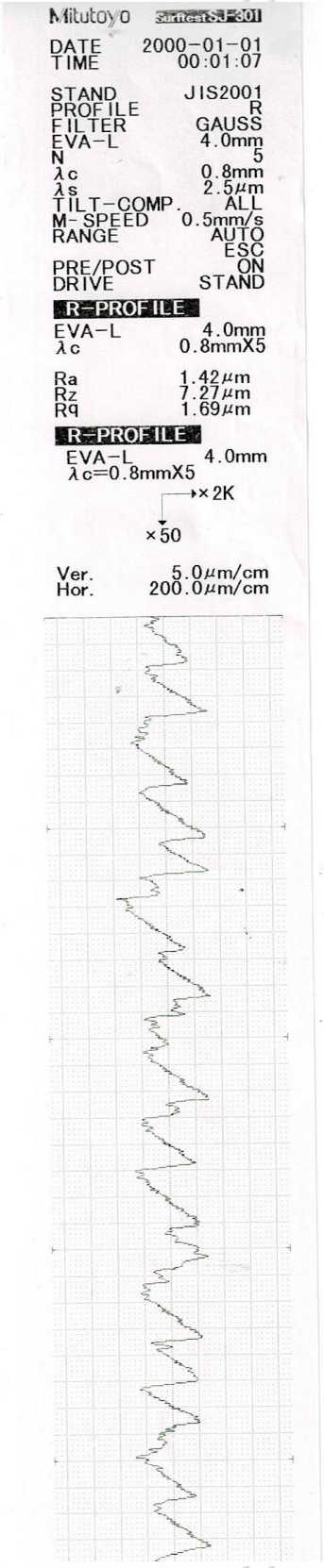
FLASH POINT (test method):	Not applicable	
AUTOIGNITION TEMPERATURE	Not applicable	
FLAMMABLE LIMITS IN AIR, % by volume	**LOWER:** Not applicable	**UPPER:** Not applicable

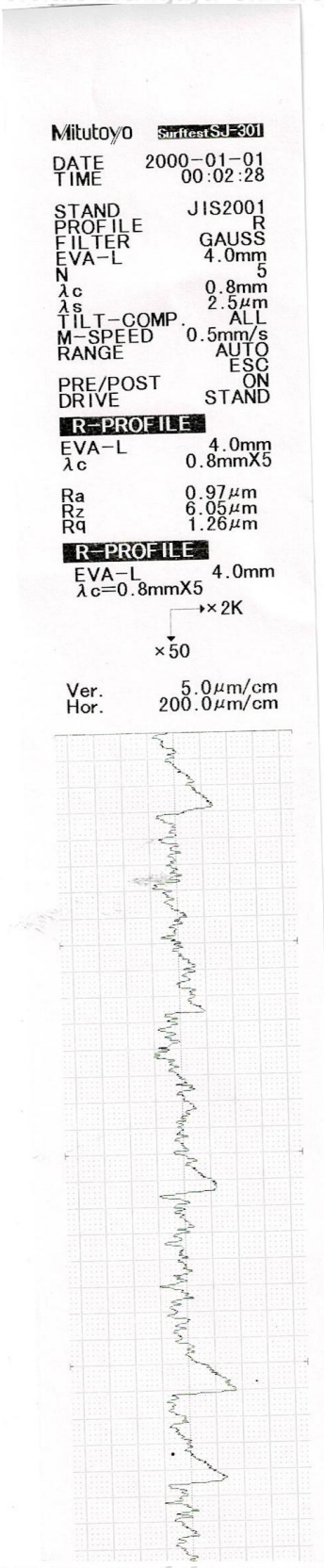
EXTINGUISHING MEDIA: Carbon dioxide cannot catch fire: Use media appropriate for surrounding fire
SPECIAL FIRE FIGHTING PROCEDURES: WARNING! Frozen carbon dioxide – extremely cold solid. Vapor can cause rapid suffocation. Evacuate all personnel from danger area. Do not discharge sprays onto solid carbon dioxide. Solid carbon dioxide will freeze water rapidly. Never handle solid carbon dioxide with your bare hands. Use insulated, loose-fitting gloves and dry ice tongs, or use a dry shovel or scoop. Move packages away from fire area if without risk. Self-contained breathing apparatus may be required by rescue workers. On-site fire brigades must comply with OSHA 29 CFR 1910.156.

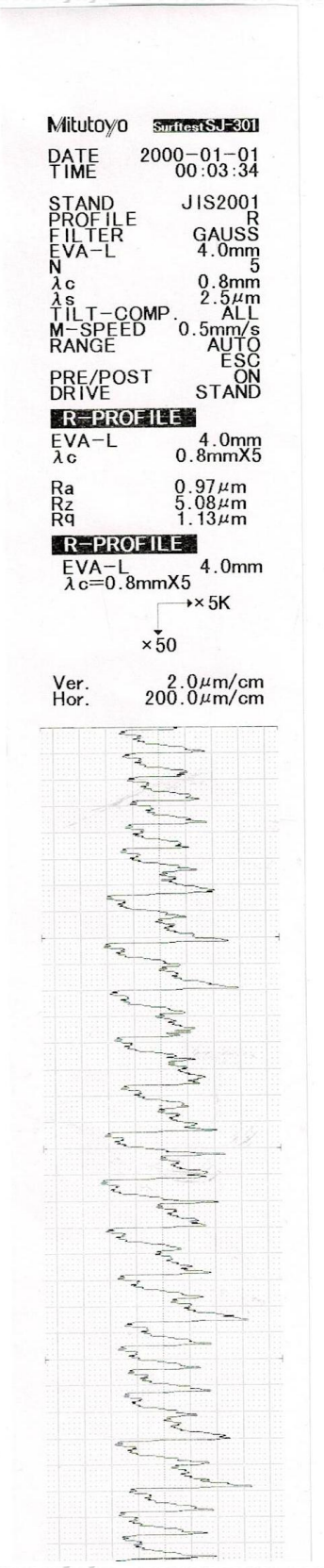
5-13-09

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya

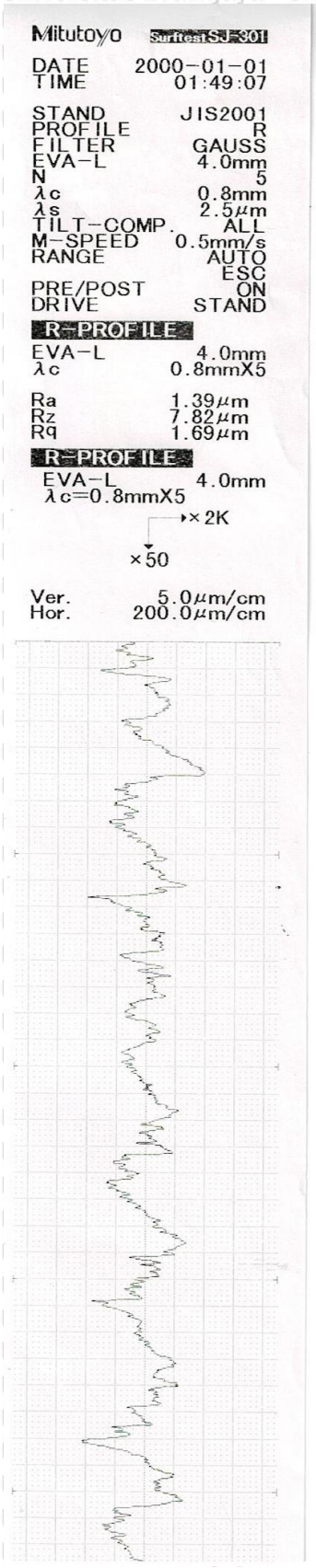
Lampiran 4 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1000 RPM dengan Perlakuan

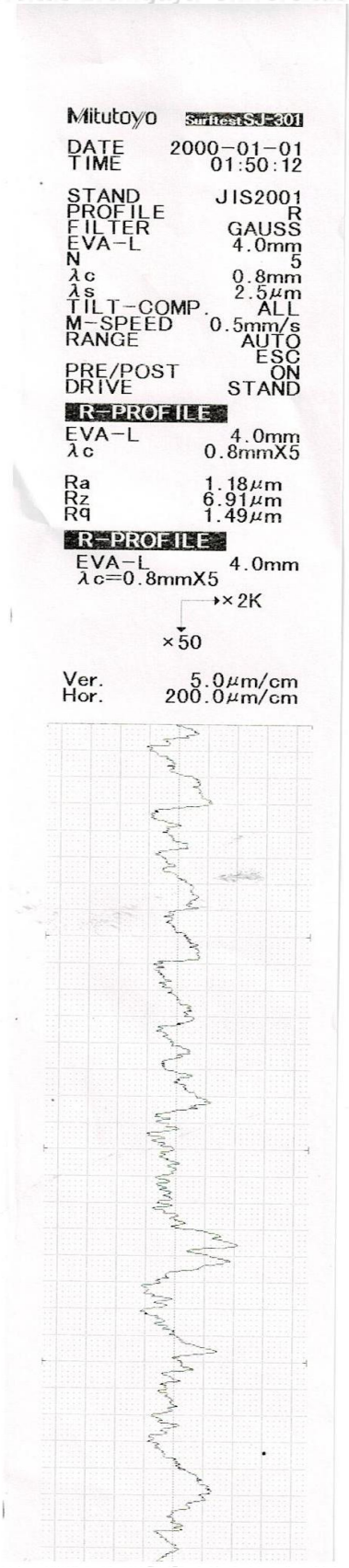


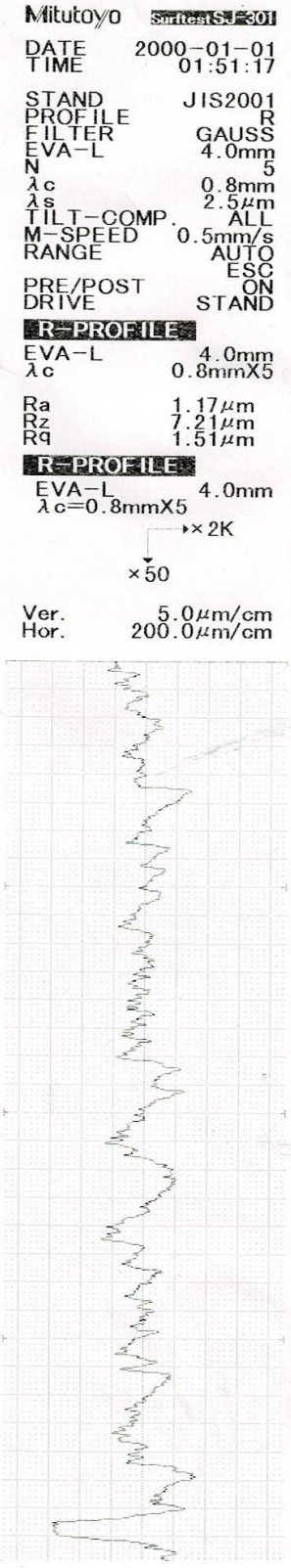




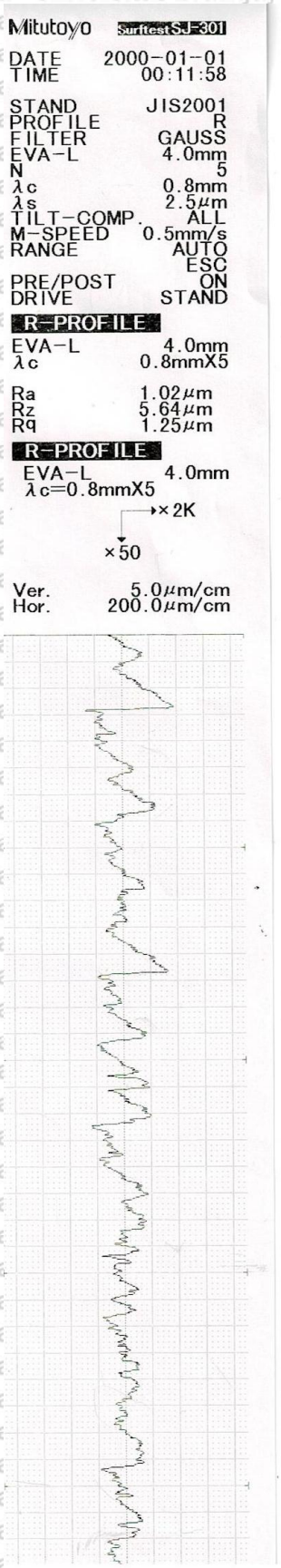
Lampiran 5 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1000 RPM tanpa Perlakuan

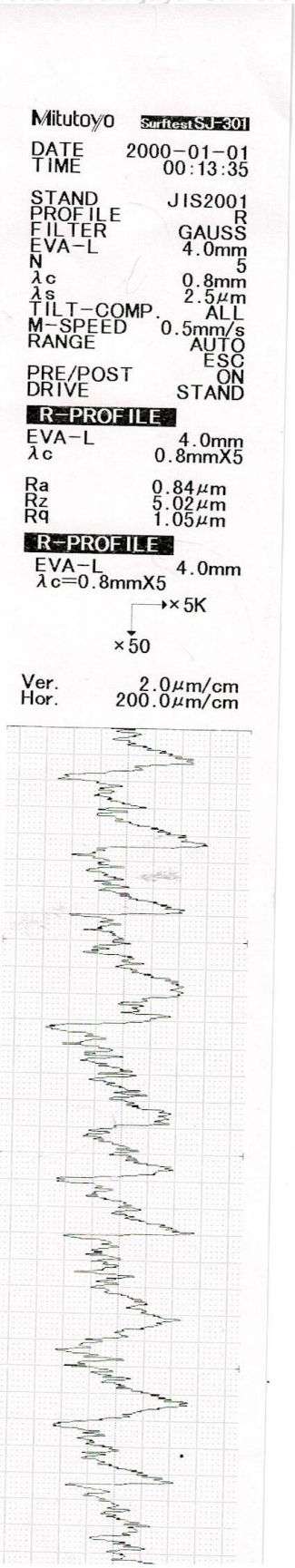


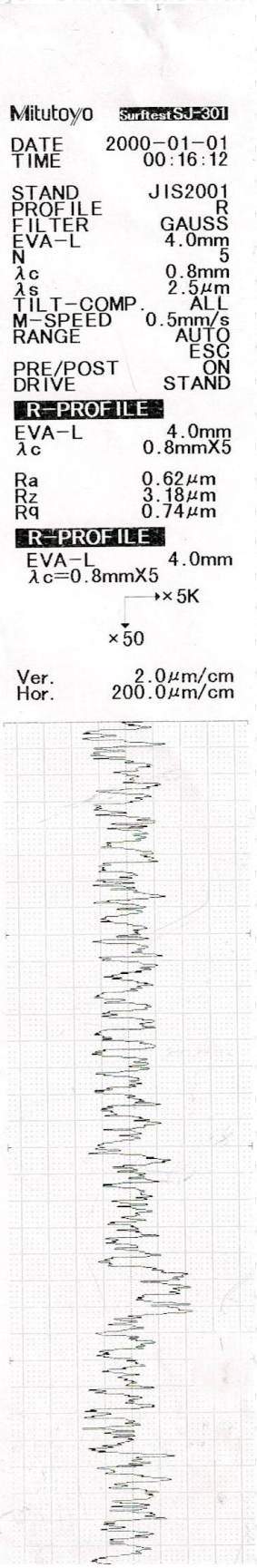




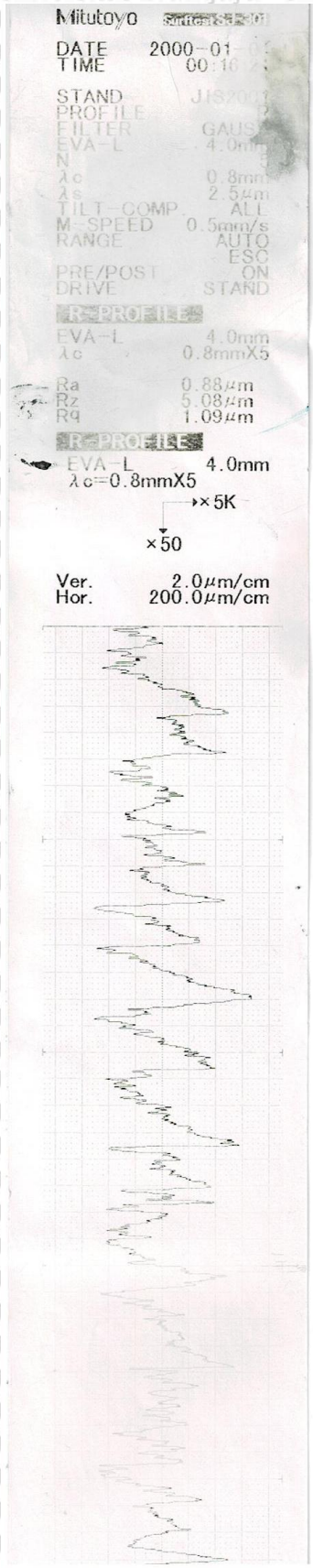
Lampiran 6 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1250 RPM dengan Perlakuan

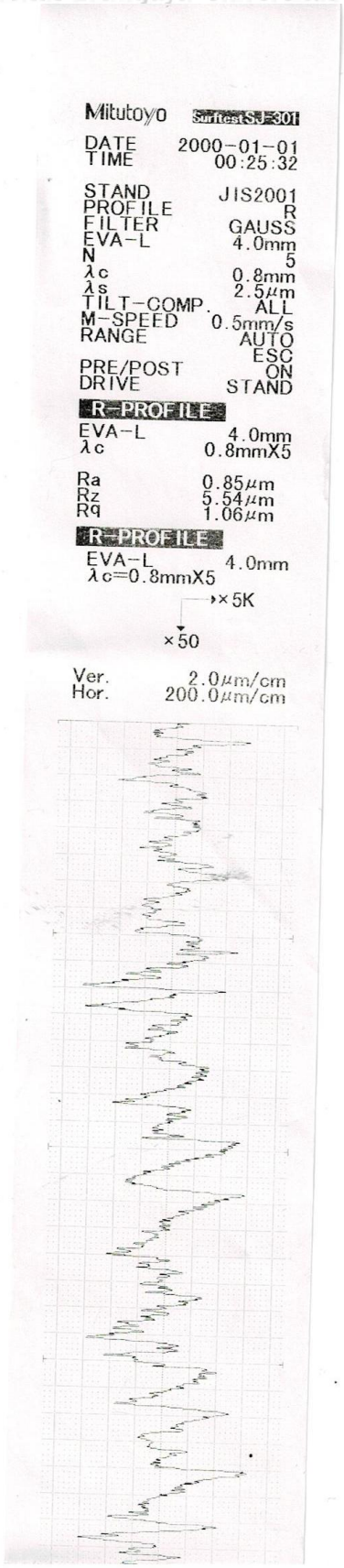


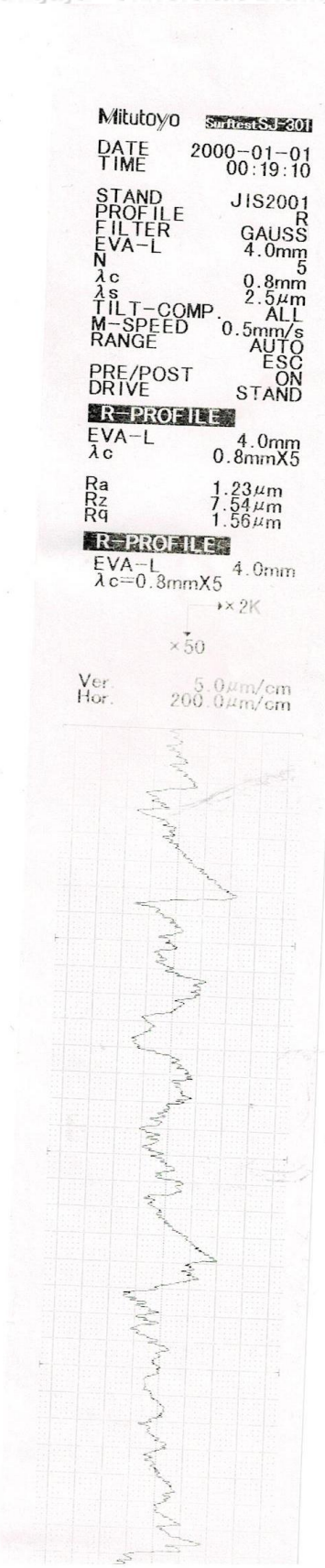




Lampiran 7 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1250 RPM tanpa Perlakuan







Lampiran 8 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1500 RPM dengan Perlakuan

Mitutoyo Surftest SJ-301

DATE 2000-01-01
TIME 01:25:23

STAND JIS2001
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
λc 0.8mm
λs 2.5μm
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
ESC
PRE/POST ON
DRIVE STAND

R-PROFILE

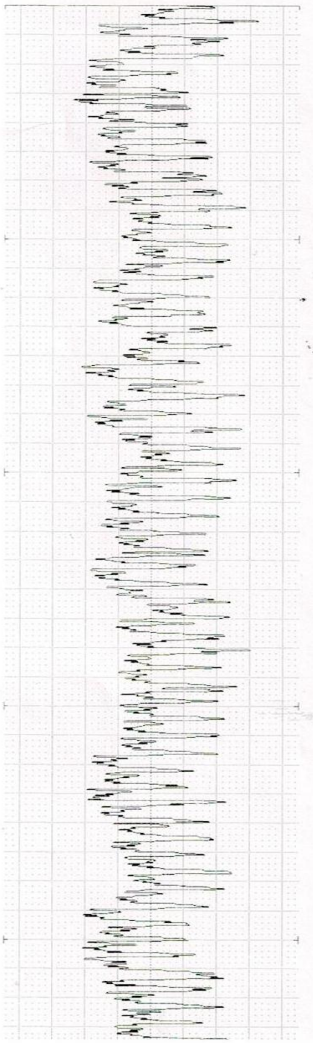
EVA-L 4.0mm
λc 0.8mmX5

Ra 0.46μm
Rz 2.45μm
Rq 0.56μm

R-PROFILE

EVA-L 4.0mm
λc=0.8mmX5
×10K
×50

Ver. 1.0μm/cm
Hor. 200.0μm/cm



Mitutoyo Surftest SJ-301

DATE 2000-01-01
TIME 01:26:31

STAND JIS2001
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
λc 0.8mm
λs 2.5μm
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
ESC
PRE/POST ON
DRIVE STAND

R-PROFILE

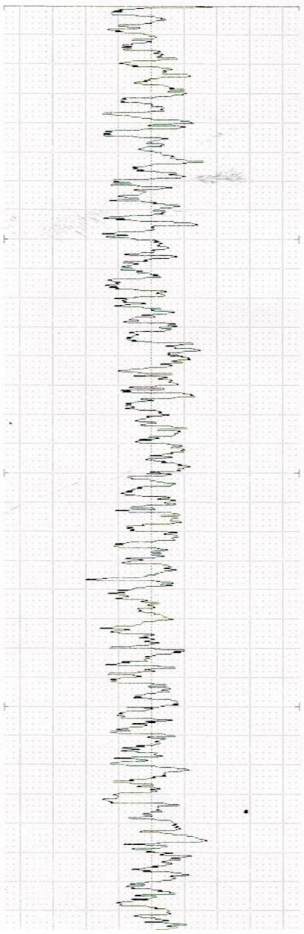
EVA-L 4.0mm
λc 0.8mmX5

Ra 0.55μm
Rz 3.15μm
Rq 0.66μm

R-PROFILE

EVA-L 4.0mm
λc=0.8mmX5
×5K
×50

Ver. 2.0μm/cm
Hor. 200.0μm/cm



Mitutoyo Surftest SJ-301

DATE 2000-01-01
TIME 01:27:33

STAND JIS2001
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
λc 0.8mm
λs 2.5μm
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
ESC
PRE/POST ON
DRIVE STAND

R-PROFILE

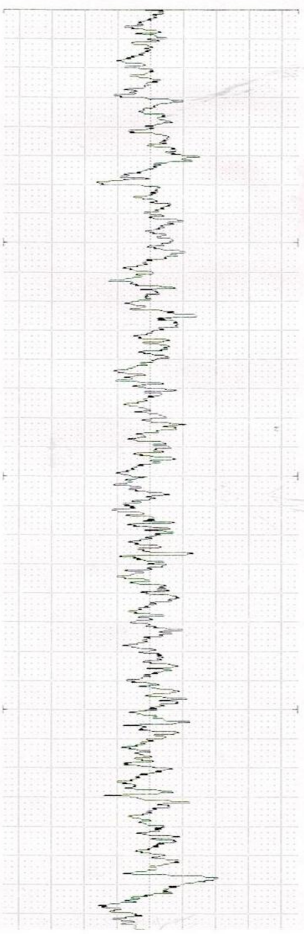
EVA-L 4.0mm
λc 0.8mmX5

Ra 0.48μm
Rz 3.27μm
Rq 0.60μm

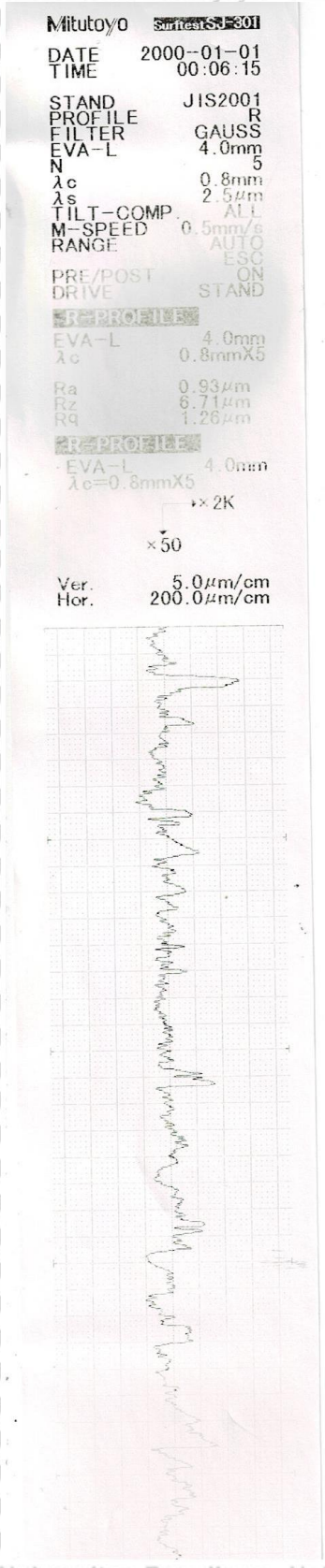
R-PROFILE

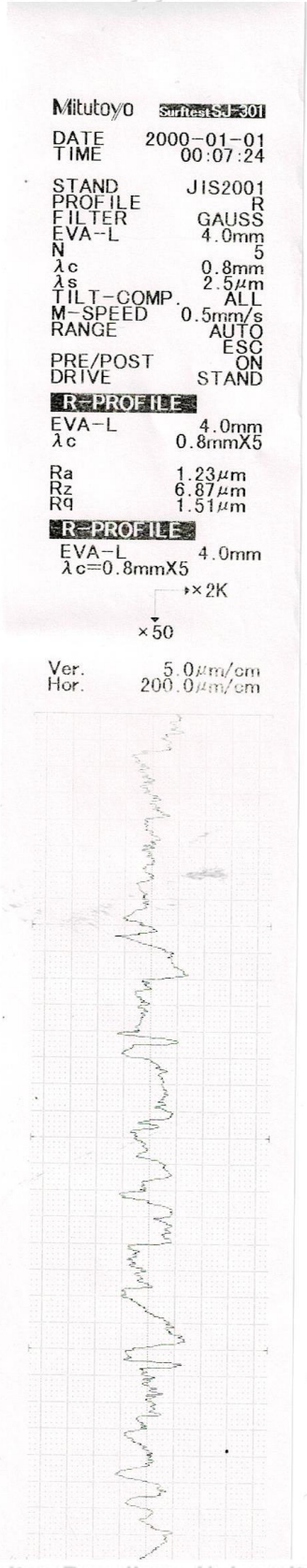
EVA-L 4.0mm
λc=0.8mmX5
×5K
×50

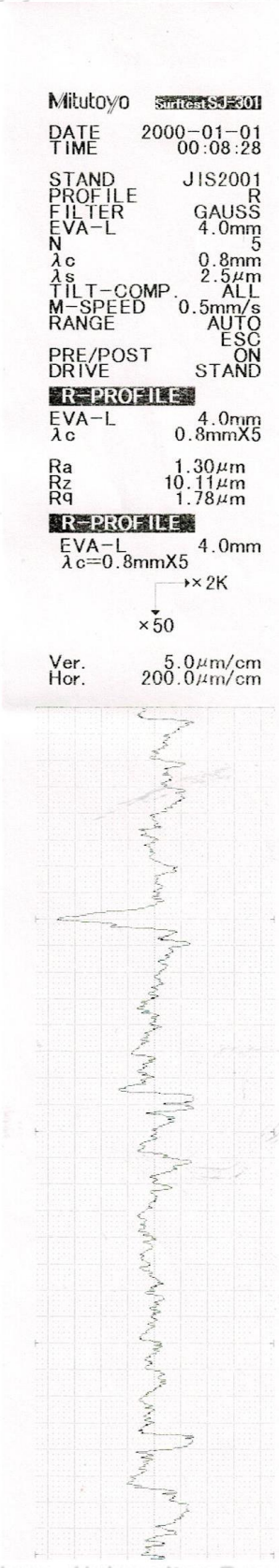
Ver. 2.0μm/cm
Hor. 200.0μm/cm



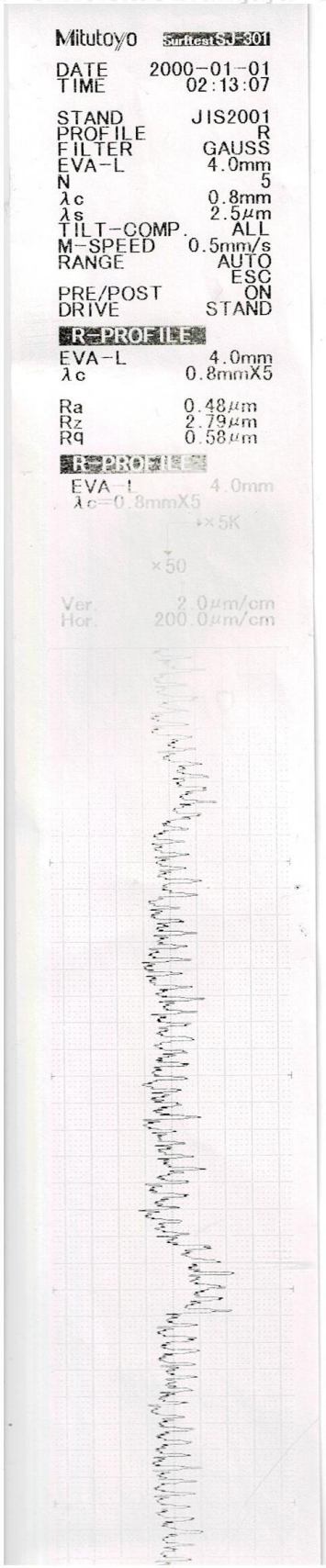
Lampiran 9 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1500 RPM tanpa Perlakuan

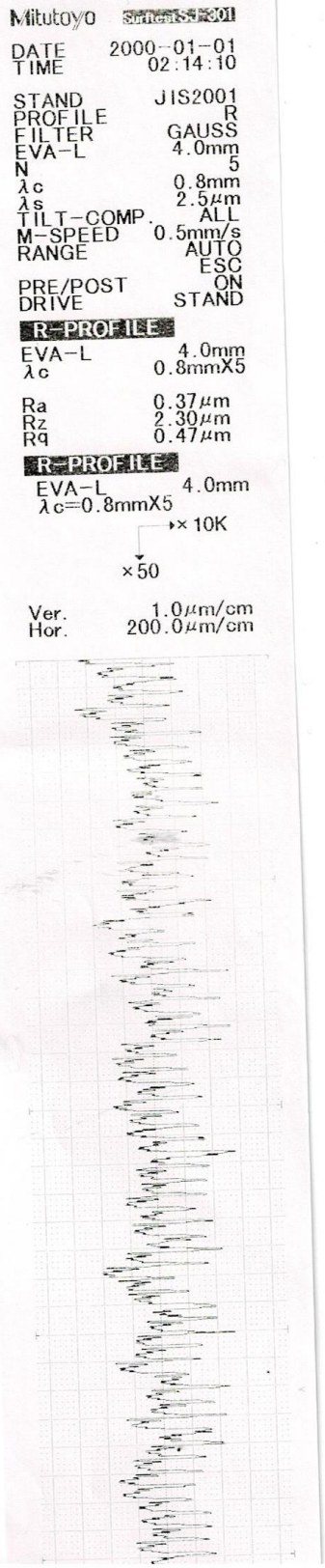


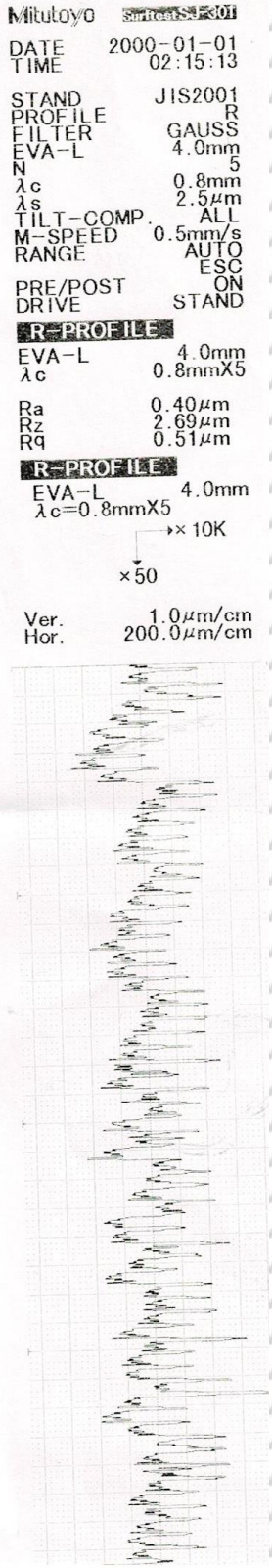




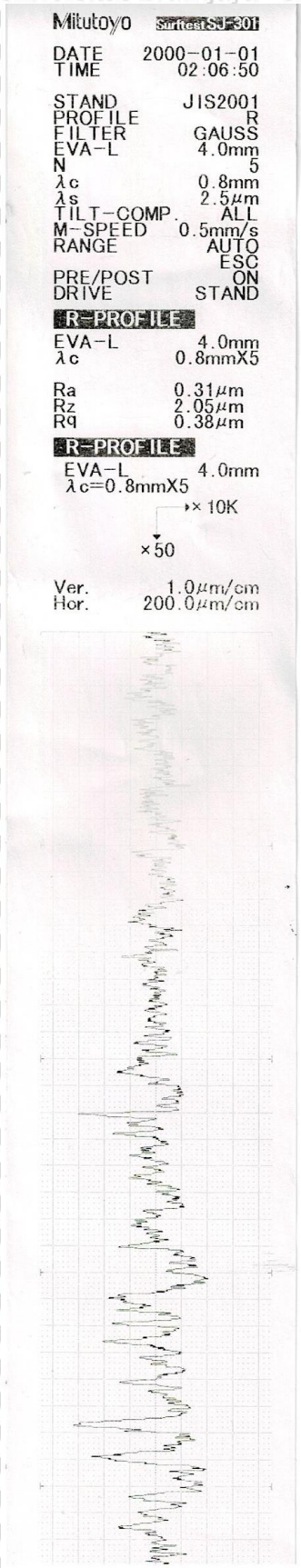
Lampiran 10 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1750 RPM dengan Perlakuan

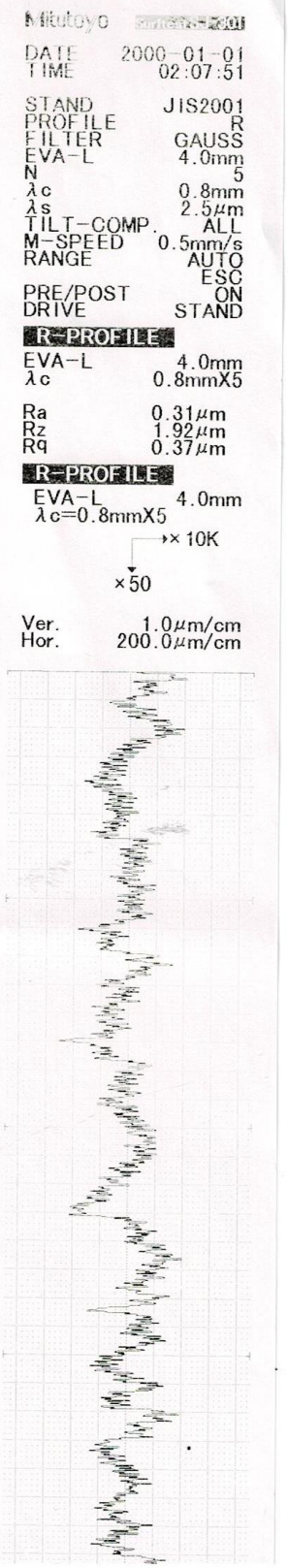


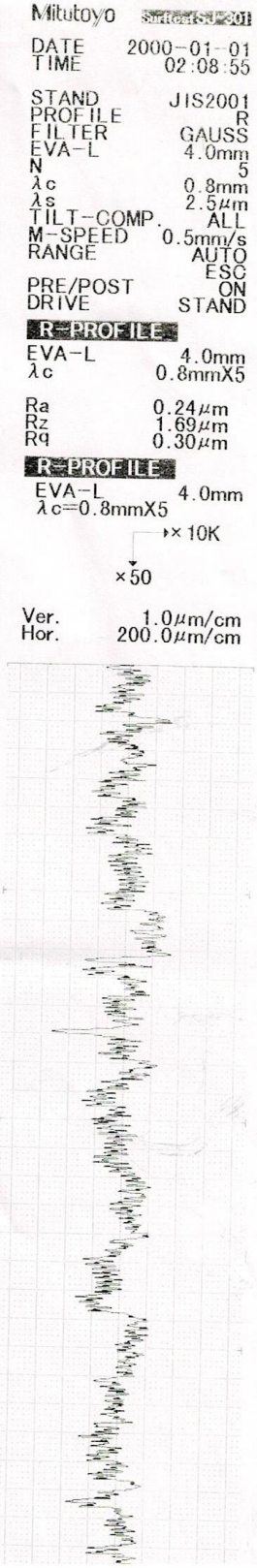




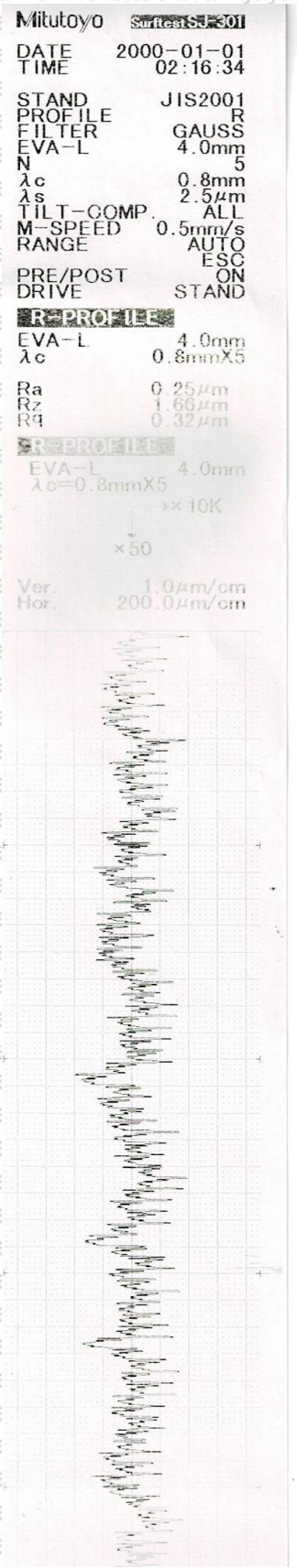
Lampiran 11 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 1750 RPM tanpa Perlakuan

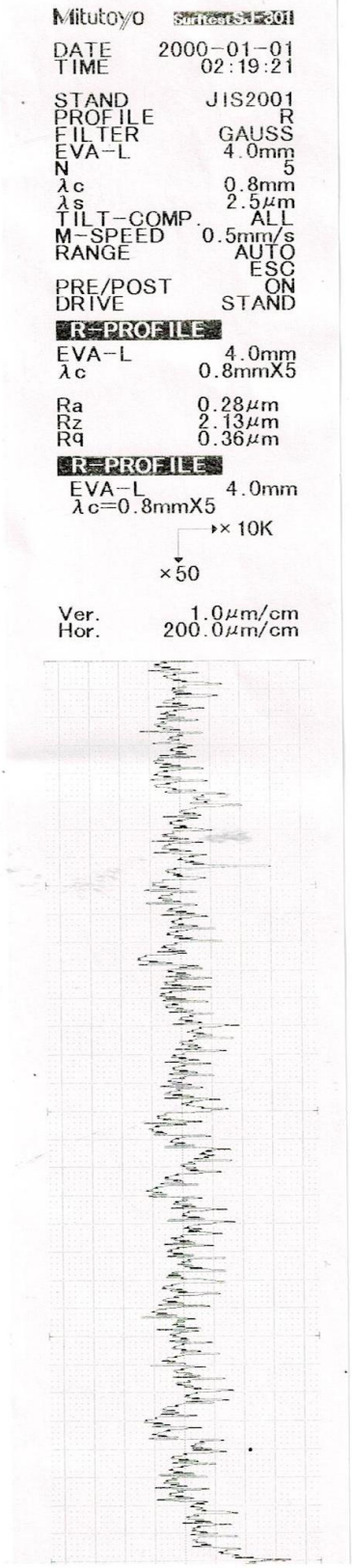


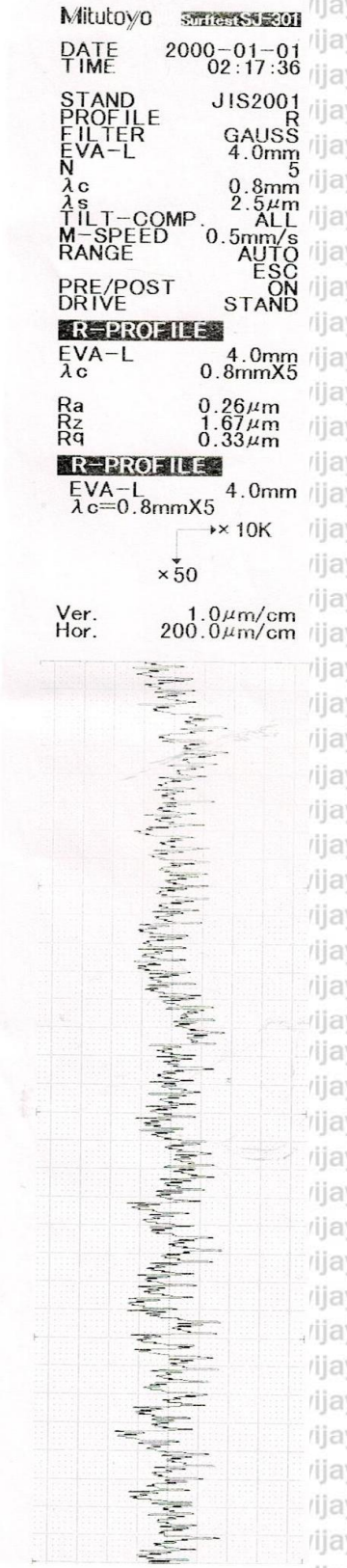




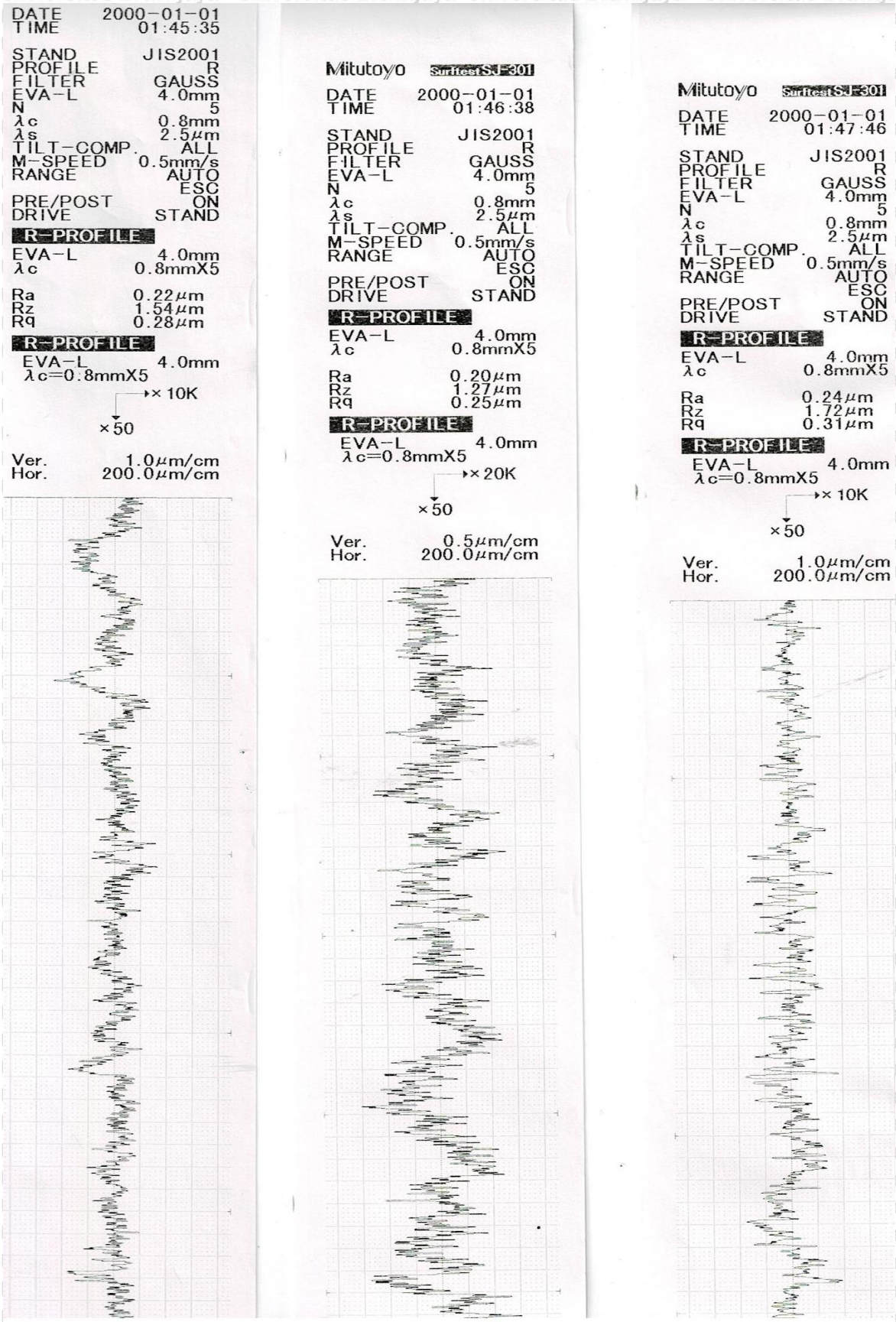
Lampiran 12 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 2000 RPM dengan Perlakuan







Lampiran 13 Hasil Kekasaran Permukaan Variasi *Spindle Speed* 2000 RPM tanpa Perlakuan



repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya