



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN DAN ANALISA LINTASAN PAHAT
OPERASI *FINISHING* PADA PROSES PEMESINAN
“*MICRO MOLD*”**

SKRIPSI

BAYU MULYA HARSONO

0806454664

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN DAN ANALISA LINTASAN PAHAT
OPERASI *FINISHING* PADA PROSES PEMESINAN
“*MICRO MOLD*”**

SKRIPSI

Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

BAYU MULYA HARSONO

0806454664

FAKULTAS TEKNIK

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2012

ii

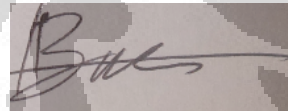
HALAMAN PERNYATAAN ORIGINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri ,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Bayu Mulya Harson

NPM : 0806454664

Tanda Tangan :



Tanggal : 2 juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

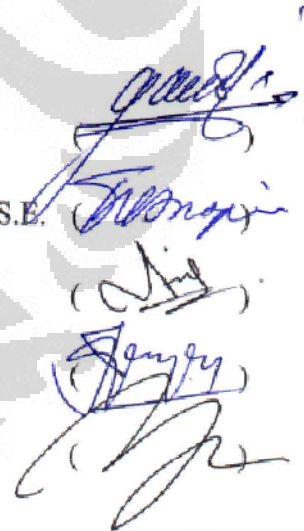
Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Bayu Mulya Harsono
NPM : 0806454664
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Pengembangan dan Analisa Lintasan Pahat Operasi *Finishing* Pada Proses Pemesinan "*Micro Mold*".

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Gandjar Kiswanto M.Eng.
Penguji : Prof. Dr. Ir. Tresna Priyana Soemardi, M.Si. S.E.
Penguji : Dr. Ario Sunar Baskoro S.T.,M.T.,M.Eng
Penguji : Jos Istiyanto S.T., M.T., Ph.D
Penguji : Yudan Whulanza S.T., M.Sc, Ph.D



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 juli 2012

KATA PENGANTAR

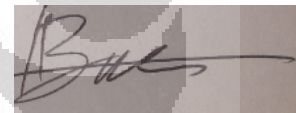
Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan berkatnya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah, Bunda, dan Adik yang telah memberikan support kepada penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan skripsi.
2. Dr. Ir. Gandjar Kiswanto M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
3. Prof. Dr. Ir. Tresna Priyana Soemardi, M.Si. S.E., Dr. Ario Sunar Baskoro S.T., M.T., M.Eng, Jos Istiyanto S.T., M.T,Ph.D dan Yudan Whulanza S.T., M.Sc, Ph.D sebagai penguji sidang skripsi.
4. Derris Surya, Achmad H, Adnan Afif Alaudin, Ferdian Harjono, M. Gani Maulana, Riandhika Yudhi, Yogi Adrian, dan Agus Siswanta yang telah membantu dalam pengambilan data percobaan.
5. Kepada Ibu Dede Lia yang telah membantu penulis bersama Derris Surya untuk pembuatan *post processor* dan pengembangan alat *micromilling*.
6. Jediel Billy Ramadhan, S.T, Teguh Santoso, S.T yang telah membantu penulis dalam menginstal *software* dan membantu memberikan solusi pada simulasi di Siemens PLM NX 8.0.
7. Saripudin, Teknik Elektro 2009 yang telah membantu penulis beserta tim riset *micromilling* dalam menyelesaikan program *interface post processor*.

8. PT. MERDEKA PRECISION, khususnya Pak Ahmad yang telah membantu penulis pada proses pembuatan *fixture*.
9. Della Listya yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga kita dapat bertemu kembali seperti di *field* kerja praktek.
10. Julius Anthoni, Bobby Surya, Nurrohman, teman-teman lainnya dan pihak-pihak yang mendukung serta teman-teman lainnya yang tidak bisa satu per satu.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga skripsi ini membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 2 Juli 2012



Bayu Mulya Harsono

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang beretanda tangan di bawah ini:

Nama : Bayu Mulya Harsono
NPM : 0806454664
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas **Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Rights)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**“PENGEMBANGAN DAN ANALISA LINTASAN PAHAT OPERASI *FINISHING*
PADA PROSES PEMESINAN CETAKAN MIKRO”**


Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2012

Yang menyatakan,


(Bayu Mulya Harsono)

vii

ABSTRAK

Nama : Bayu Mulya Harsono.
Program Studi : Teknik Mesin.
Judul : PENGEMBANGAN DAN ANALISA POLA LINTASAN PAHAT OPERASI *FINISHING* PADA PEMESINAN “*MICRO MOLD*” .

Dengan berkembangnya teknologi mikrofabrikasi, maka mendorong industri manufaktur untuk memproduksi *part – part* berskala mikro dengan waktu yang cepat dan murah, seperti proses *injection molding*. Sehingga dibutuhkan suatu *mold* yang berskala mikro untuk mendukung proses produksi tersebut. Pada penelitian ini dilakukan pemesinan produk “*micro mold*” dengan material *steel* ST41 dan Aluminium AA 1100 menggunakan *micro milling* pergerakan tiga axis. Model produk yang di *machining* berupa *sculptured surface* dan logo *Android* dengan raw material berbentuk kubus berdimensi panjang 3 mm. Program *finishing* yang digunakan pada pemesinan model *sculptured surface* adalah *contour area* menggunakan *tool path* parallel *zig – zag* dengan *depth per cut* 12.5 μm dan *step over* 5 μm serta dua layer pemesinan. Cutting tool yang digunakan operasi tersebut, *ball nose end mill* 0.1 mm *carbide coated*. Setelah proses *machining* selesai, dilakukan pengambilan foto hasil pemesinan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) sehingga terlihat lebih detail permukaan pemesinan dan di analisa permukaan hasil pemesinan berdasarkan kesesuaian dengan *designed surface* pada *CAD model*. Selain itu, dianalisa pula banyaknya *cutter location point* (CL *point*) sebanyak 32 CL *point* per millimeter pada lintasan pahat yang bergerak di tengah *sculptured surface* pada proses *finishing* dan analisa *machining tolerance* pada lintasan pahat operasi *finishing* dengan lebar *tolerance band* sebesar 1 mikrometer untuk besarnya setiap *intol* dan *outol tolerance curve*. Hasil analisa *machining tolerance*, menyatakan bahwa *cutter contact point* (CC *point*) dari lintasan pahat tersebut masih berada di dalam *tolerance band*. Sehingga perencanaan *machining* menggunakan *CAM software* dengan *cutting parameter* yang terkait dapat di gunakan untuk *micro – machining*.

Kata kunci : lintasan pahat, CL –*point*, CC – *point*, “*micro mold*”, *micro milling*, operasi *finishing*, *machining tolerance*.

ABSTRACT

Name : Bayu Mulya Harsono.
Study Program : Mechanical Engineering.
Title : Finishing Tool – Path Pattern Development and Analysis for “*micro mold*” Machining.

The technology development of micro fabrications is encouraging manufacturers to produce micro-scaled industrial parts with a fast and cheap production, such as injection molding process. So it takes a micro-scale mold to support the production process. This research discusses about the results of micro-milling in micro – mold manufacturing which is using ST41 steel and aluminum AA 1100 materials with three axis machining. The model machined products are sculptured surface and android logo with a cubical raw material with 3 mm dimension length. The sculptured surface finishing program is used contour area with parallel zig tool – path. The cutting tools were used 0.1 mm ball nose end mill carbide coated. The SEM (Scanning Electron Microscope) photograph was taken after the machining process, therefore the machined surface can be examined more detailed. From the SEM photograph, the geometry comparison between CAD model and machined surface was done. The analysis of the cutter location point (CL – point) density was done on the center line of sculptured surface in finishing operation. The result of experiment and analysis shows that the density of CL – point on observed tool – path segment is 32 CL – point per millimeter. The width of tolerance band is 1 micrometer for each intol and outol tolerance. For the machining tolerance analysis, all the cutter contact points (CC – point) are inside the tolerance band. It is concluded that the tool – path designing with CAM software and its cutting parameter are capable for micro machining process.

Key words: tool – path, CL – point, CC – point, “*micro mold*”, micro milling, finishing operation, machining tolerance.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Metodologi Penelitian.....	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. PROSES PEMESINAN CETAKAN MIKRO DENGAN <i>MICRO MILLING</i>	8
2.1. Cetakan (<i>molding</i>) Mikro.....	8
2.2. Proses Milling dan Parametrisasi yang Terkait.....	11
2.2.1. Tipe Milling <i>Machine Tool</i>	11
2.2.2. Parameter Pemesinan.....	13
2.2.3. Conventional mill dan Climb mill.....	16
2.2.4. Mata <i>Pahat Potong</i> (<i>Cutting Tool</i>).....	18
2.3. Proses Manufaktur Menggunakan sistem CAD / CAM	20
2.3.1. Permodelan Tiga Dimensi.....	20
2.3.2. Proses Perencanaan Pemesinan.....	21
2.3.3. <i>Post Processor</i>	24
BAB 3. ALUR KERJA PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO	26
3.1. Tahapan Desain CAD	27

3.1.1.	Desain Model <i>Sculpture Surface</i>	27
3.1.2.	Desain logo <i>Android</i>	30
3.2.	Pemilihan Cutting Parameter proses pemesinan	31
3.3.	Tahapan Desain Program Pemesinan CAM dengan Model <i>Sculptured Surface</i> dan Logo <i>android</i>	33
3.2.1.	Desain Program CAM Model <i>Sculptured Surfaced</i>	34
3.2.2.	Tahapan Desain Program Alternatif untuk Pemesinan Model <i>Sculptured Surface</i> 55	
3.2.3.	Tahapan Desain Program Pemesinan CAM pada Logo Android	62
3.4.	NC <i>Generation</i>	84
3.5.	Spesifikasi <i>Machine Tool</i> Beserta Komponen yang Terkait.....	86
3.4.1.	Spesifikasi <i>Machine Tool</i>	86
3.4.2.	Spesifikasi <i>Cutting tool</i> yang digunakan	93
3.4.3.	Spesifikasi Material <i>Workpiece</i> yang digunakan	96
3.4.4.	Desain <i>Fixture</i>	97
3.4.5.	Karakteristik Kecepatan Spindle.....	99
3.1.	Pengukuran dan Visualisasi <i>Scanning Electron Microscope</i>	100
BAB 4. HASIL DAN ANALISA PROSES PEMESINAN PADA “MICRO MOLD”		102
4.1.	Analisa <i>Cutting time theoretical</i> dan <i>actual</i>	102
4.2.	Hasil dan Analisa Permukaan Hasil Pemesinan	105
4.2.1.	Model <i>Sculptured Surface</i>	105
4.2.2.	Model <i>Android</i>	111
BAB 5. ANALISA LINTASAN PAHAT OPERASI FINISHING		115
5.1.	Analisa jumlah CL – <i>point</i> pada tengah <i>Sculptured Surfaced</i>	116
5.2.	Analisa Region dari Kurva <i>Machining Tolerance</i> dan CL – <i>Curved</i>	116
5.1.	Analisa penyebaran <i>Cutter Contact</i> di dalam <i>Tolerance Band</i>	123
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT		125
DAFTAR REFERENSI		127

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Spesifikasi geometri cetak [2]	8
Gambar 2.2 Mesin Micro Injection Molding [5]	9
Gambar 2.3 Diagram scalling [7].....	10
Gambar 2.4 Mesin milling 3 axis [9]	12
Gambar 2.5 Sumbu axis X,Y,Z dan A,B, C [10].....	12
Gambar 2.6 Mesin milling 5 axis [10]	12
Gambar 2.7 Conventional mill [14]	16
Gambar 2.8 Climb mill [14]	16
Gambar 2.9 Spesifikasi bagian cutting tool [16]	19
Gambar 2.10 Collision [18].....	22
Gambar 2.11 Gauging [19].....	22
Gambar 2.12 Tipe pergerakan non cutting move [20]	23
Gambar 2.13 Machining tolerace [21]	24
Gambar 2.14 Posisi post processor berada di antara CAD - CAM system [22]	25
Gambar 3.1 Alur Proses kerja.....	26
Gambar 3.2 Permukaan kurva sculpture surface	27
Gambar 3.3 Tampak Samping Sculptured Surface.....	28
Gambar 3.4 Tampak isometri Sculptured Surface.....	28
Gambar 3.5 Female part.....	29
Gambar 3.6 Male Part.....	30
Gambar 3.7 Male part Android.....	30
Gambar 3.8 Female part Android	31
Gambar 3.9 Toolpath roughing 2 (program corner rough) model sculptured surface female 38	
Gambar 3.10 Toolpath semi finishing model sculptured surface tipe female	39
Gambar 3.11 Toolpath finishing model sculptured surface tipe female	42
Gambar 3.12 Hasil roughing 1 model sculptured surface tipe female	42
Gambar 3.13 Hasil roughing 2 model sculptured surface tipe female	43
Gambar 3.14 Hasil semi finishing model sculptured surface tipe female	43
Gambar 3.15 Hasil finishing model sculptured surface tipe female	44
Gambar 3.16 Toolpath operasi Roughing 1 (facemilling areal) model surface sculptured tipe male.....	47
Gambar 3.17 Toolpath operasi roughing 2 model sculptured surface tipe male	49
Gambar 3.18 Toolpath operasi semi finishing model sculptured surface tipe male	51
Gambar 3.19 Toolpath finishing model sculptured surface tipe male	53
Gambar 3.20 Hasil operasi roughing model sculptured surface tipe male	54
Gambar 3.21 Hasil operasi roughing 2 models sculptured surface tipe male.....	54
Gambar 3.22 Hasil operasi semi finishing model sculptured surface tipe male	55
Gambar 3.23 Hasil operasi finishing model sculptured surface tipe male	55
Gambar 3.24 Toolpath roughing areal badan model android tipe female	64
Gambar 3.25 Toolpath roughing areal kepala model android tipe female	66

Gambar 3.26 Toolpath roughing areal tangan model android tipe female.....	67
Gambar 3.27 Toolpath semi finishing areal badan model android tipe female	69
Gambar 3.28 Toolpath semi finishing areal kelapa model android tipe female	70
Gambar 3.29 Toolpath finishing model android tipe female.....	72
Gambar 3.30 Roughing areal badan model android tipe female	73
Gambar 3.31 Hasil roughing areal kepala model android tipe female.....	73
Gambar 3.32 Hasil roughing areal tangan model android tipe female.....	74
Gambar 3.33 Hasil semi finishing areal badan model android tipe female.....	74
Gambar 3.34 Hasil semi finishing areal kepala model android tipe female.....	75
Gambar 3.35 Hasil finishing areal kepala model android tipe female	75
Gambar 3.36 Toolpath operasi roughing areal luar model android tipe male	77
Gambar 3.37 Toolpath semi finishing areal atas profil model android tipe male.....	79
Gambar 3.38 Toolpath finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male.....	80
Gambar 3.39 Toolpath finishing deburring model android tipe male.....	82
Gambar 3.40 Hasil akhir operasi roughing model android tipe male	82
Gambar 3.41 Hasil akhir operasi semi finishing areal atas profil model android tipe male....	83
Gambar 3.42 Hasil akhir finishing areal luar dan dalam profil model android tipe male	83
Gambar 3.43 Hasil akhir operasi finishing deburring model android tipe male.....	84
Gambar 3.44 Data CL – file	85
Gambar 3.45 Data NC – file.....	85
Gambar 3.46 Mesin Micro – Milling 5 axis.....	86
Gambar 3.47 Sistem koordinat 5 axis [10].....	87
Gambar 3.48 Dimensi collet [24].....	89
Gambar 3.49 Dimensi collet nut [24].....	89
Gambar 3.50 Skematik control motor CNC dan monitoring.....	90
Gambar 3.51 motorized table type KS402-75[25].....	92
Gambar 3.52 motorized table type KXC0602-G [25].....	92
Gambar 3.53 motorized table type KRW06360 [25]	92
Gambar 3.54 Flat end mill “ innova tool” [26].....	94
Gambar 3.55 Flat end mill “ NS Cutting tool”[27].....	95
Gambar 3.56 Spesifikasi geometri ball nose end mill “ SECO” [28]	95
Gambar 3.57 Fixture 1	97
Gambar 3.58 Fixture 2	98
Gambar 3.59 Grafik Karakteristik spindel saat kompresor dinyalakan	99
Gambar 3.60 SEM [31].....	100
Gambar 3.61 Dino Eye Digital Microscope [32].....	101
Gambar 4.1 Komparasi waktu pemesinan antara teoritis dan aktual pada model sculptured surface tipe male dan female	102
Gambar 4.2 Grafik Machining Tolerance pada operasi semi finishing.....	106
Gambar 4.3 Region A	107
Gambar 4.6 Region D	107

Gambar 4.4 Region B.....	107
Gambar 4.5 Region C.....	107
Gambar 4.7 Hasil akhir semi finishing cutting dengan tool flat end mill 0.2 mm	108
Gambar 4.8 Hasil akhir semi finishing cutting dengan cutting tool ball nose end mill 0.1 mm	108
Gambar 4.9 Hasil akhir finishing material workpiece steel	110
Gambar 4.10 Hasil akhir finishing material workpiece aluminium alloy	111
Gambar 4.11 Hasil akhir finishing model android tipe female.....	112
Gambar 4.12 Channel pada areal model android tipe female.....	113
Gambar 4.13 Hasil finishing deburring pada model android tipe male	114
Gambar 4.14 CAD model android tipe male.....	114
Gambar 5.1 Dimensi Sculptured surface untuk “micro mold”	115
Gambar 5.2 Dimensi panjang CL – point.....	116
Gambar 5.3 Machining tolerane operasi finishing model sculptured surface tipe male material aluminium	117
Gambar 5.4 Region A dari machining tolerace finishing.....	118
Gambar 5.5 Region B dari machining tolerace finishing.....	119
Gambar 5.6 Region C dari machining tolerace finishing.....	120
Gambar 5.7 Region D dari machining tolerace finishing.....	121
Gambar 5.8 Region E dari machining tolerace finishing	122
Gambar 5.9 Grafik posisi cutter contact terhadap permukaan workpiece.....	123

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Depth per cut dan radial of cut [11].....	13
Tabel 3.1 Cutting parameter untuk proses pemesinan [11]	32
Tabel 3.2 cutting parameter tiap cutting tool.....	32
Tabel 3.3 komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel	35
Tabel 3.4 Cutting parameter roughing 1 sculptured surface female	35
Tabel 3.5 Speed factor roughing 1 sculptured surface female.....	36
Tabel 3.6 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [11].....	36
Tabel 3.7 komparasi ap dan ae antara teoritis – actual untuk workpiece steel	37
Tabel 3.8 Cutting parameter roughing 2 sculptured surface female	37
Tabel 3.9 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [11].....	37
Tabel 3.10 Komparasi nilai ap dan ae antara teoritis dan actual untuk workpiece steel	39
Tabel 3.11 Cutting Parameter semi finishing model sculptured surface tipe female	40
Tabel 3.12 Speed factor semi finishing model sculptured surface tipe female	40
Tabel 3.13 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [11].....	40
Tabel 3.14 Komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel.....	41
Tabel 3.15 Cutting parameter finishing model sculptured surface tipe female	41
Tabel 3.16 komparasi nilai ap dan ae actual – teoritis untuk workpiece steel.....	45
Tabel 3.17 komparasi nilai ap dan ae actual – teoritis untuk workpiece aluminium	45
Tabel 3.19 Speed factor operasi roughing 1 untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	46
Tabel 3.18 Cutting parameter operasi roughing 1 (facemilling areal)untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	46
Tabel 3.20 Komparasi nilai ap dan ae antara katalog dan actual untuk workpiece steel	47
Tabel 3.21 Komparasi nilai ap dan ae antara katalog dan actual untuk workpiece aluminium	48
Tabel 3.22 Cutting Parameter operasi Roughing 2 untuk workpiece steel model surface sculptured tipe male	48
Tabel 3.23 Speed factor operasi roughing 2 untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	48
Tabel 3.24 Komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel.....	50
Tabel 3.25 Komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untu workpiece aluminium. ...	50
Tabel 3.26 Cutting parameter operasi semi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	50
Tabel 3.27 Speed factor operasi semi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	51
Tabel 3.28 Komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel.....	52
Tabel 3.29 komparasi nilai ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece aluminium....	52

Tabel 3.30 Cutting Parameter operasi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male	52
Tabel 3.31 Speed factor poerasi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male.....	53
Tabel 3.32 Cuting parameter operasi roughing program alternative sculptured surface.....	57
Tabel 3.33 Komparasi nilai ap dan ae aktual – teoritis	57
Tabel 3.34 Speed factor operasi roughing program alternative sculptured surface	57
Tabel 3.35 Cutting parameter operasi roughing 2 program alternative sculptured surface.....	58
Tabel 3.36 Komparasi nilai ap dan ae antara aktual - teoritis.....	58
Tabel 3.37 Speed factor operasi roughing program alternative sculptured surface	58
Tabel 3.38 Cutting parameter operasi semi finishing program alternative sculptured surface.....	59
Tabel 3.39 Speed factor operasi semi finishing program alternative sculptured surface	59
Tabel 3.40 Komparasi nilai ap dan ae antara aktual - teoritis.....	60
Tabel 3. 41 Cutting parameter operasi semi finishing program alternative sculptured surface	60
Tabel 3. 42 Speed factor operasi semi finishing program alternative sculptured surface	60
Tabel 3.43 Komparasi nilai ap dan ae antara aktual - teoritis.....	61
Tabel 3.44 Cutting parameter operasi finishing program alternative sculptured surface.....	61
Tabel 3.45 Speed factor operasi finishing program alternative sculptured surface	62
Tabel 3.46 Komparasi nilai ap dan ae antara aktual - teoritis.....	62
Tabel 3.47 cutting parameter operasi roughing areal badan model android tipe female.....	63
Tabel 3. 48 Speed factor operasi roughing areal badan model android tipe female	64
Tabel 3. 49 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk wokpiece steel.....	64
Tabel 3.51 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel	65
Tabel 3.52 Speed factor untuk operasi roughing kepala model android tipe female	65
Tabel 3.50 Cutting parameter operasi roughing areal kepala model android tipe female.....	65
Tabel 3.54 speed factor untuk operasi roughing tangan model android tipe female.....	66
Tabel 3.53 Cutting parameter roughing areal tangan model android tipe female.....	66
Tabel 3.55 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel	67
Tabel 3.56 Cutting parameter untuk semi finshing badan model android tipe female.....	68
Tabel 3.57 Speed factor untuk operasi semi finishing badan model android tipe female	68
Tabel 3.58 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel.....	68
Tabel 3.59 Cuting parameter semi finishing kepala model android tipe female	69
Tabel 3.60 Speed factor untuk operasi semi finishing kepala	70
Tabel 3.61 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel.....	70
Tabel 3.63 Speed factor untuk operasi semi finishing kepala model android tipe female	71
Tabel 3.62 Cutting parameter operasi finishing model android tipe female	71
Tabel 3.64 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel.....	72
Tabel 3.65 Cutting parameter proses roughing model android tipe male	76
Tabel 3.66 Speed factor untuk operasi roughing model android tipe male	77
Tabel 3.67 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel.....	77

Tabel 3.68 Cutting parameter proses semi finishing areal atas profil model android tipe male	78
Tabel 3.69 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk material steel.....	78
Tabel 3.70 Speed factor operasi semi finishing areal atas profil model android tipe male	78
Tabel 3.71 Cutting parameter proses finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male.....	79
Tabel 3.72 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel.....	80
Tabel 3.73 Speed factor untuk operasi finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male.....	80
Tabel 3.74 Cutting parameter proses finishing deburring model android tipe male.....	81
Tabel 3.75 Komparasi nilai ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel	81
Tabel 3.76 Speed factor untuk operasi finishing deburring model android tipe male	81
Tabel 3.77 Spesifikasi diameter collet [24].....	89
Tabel 3.78 Karakteristik Motor Penggerak [25].....	91
Tabel 3.79 Dimensi cutting tool flat end mill [26]	94
Tabel 3.80 Dimensi cutting tool flat end mill [27]	95
Tabel 3.81 Dimensi cutting tool [28].....	96
Tabel 3.82 mechanical properties aluminium alloy [29].....	96
Tabel 5.0.1 Pengelompokan jumlah posisi cutter contact.....	124

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan manusia mendorong teknologi untuk lebih maju dan inovatif seiring dengan perkembangan zaman, relevansi terhadap waktu kerja manusia dimana menginginkan proses yang lebih cepat dari sebelumnya. Sebagai contoh: perkembangan *chip* elektronik, media komunikasi, kendaraan, dan teknologi produksi. Dengan ukuran produk yang semakin kecil, maka diharapkan kerja manusia menjadi lebih cepat dan kompakitas produk menjadi lebih baik.

Seiring berkembangnya desain produk yang dimensi semakin kecil dan kebutuhan yang semakin ringkas. Umumnya, produk yang dapat dilihat secara mata telanjang dan digenggam memiliki dimensi lebih dari satu milimeter. Sedangkan produk yang tergolong mikro memiliki dimensi kurang dari satu milimeter, sehingga diperlukan proses manufaktur yang presisi dan memiliki toleransi semakin kecil.

Perkembangan teknologi mikro dimulai sejak ditemukannya semikonduktor yang mulai di aplikasikan pada *chip*. Contoh aplikasi dari teknik tersebut pada proses pembuatan *microchip* komputer dengan berbasis dasar material Silikon yang bersifat semikonduktor. Kemudian dilanjutkan pada akhir tahun 1980an dipublikasi hasil riset pemesinan mikro dengan menggunakan *flat end mill* bermaterial intan dan hingga saat ini masih terus dikembangkan proses pemesinan mikro dengan menggunakan mesin milling 5 axis beserta parameter yang mempengaruhi hasil akhir pemesinan tersebut.[1]

Salah satu aplikasi mikro fabrikasi yaitu pada proses micro machining, dimana produk yang dibuat adalah *micromolding*. *Moulding* digunakan sebagai cetakan material logam, sedangkan cetakan material non logam disebut *dies*. Pembuatan *moulding* dilakukan dengan proses pemesinan pada

sebuah benda kerja (*workpiece*). Produk yang dihasilkan ada dua macam, *male* dan *female*. Bagian yang memiliki *cavity* dan riser adalah *female*, sedangkan bagian mencetak filler cair dengan kontur yang menonjol adalah *male*. Proses produksi menggunakan mold dinilai lebih efisien dan cepat, karena merubah bentuk *workpiece* hanya dicetak dan di akhiri *finishing*. Oleh karena itu, proses produksi dengan menggunakan mold banyak digunakan pada industry skala massal.

Proses manufaktur mould dengan pemesinan milling dan turning menggunakan raw material berupa alloy steel dan carbon steel, dimana material tersebut mudah untuk di manufaktur dengan pemesinan. Proses pemesinan mold yang semakin presisi dan rumit mengharuskan mesin milling harus dapat bergerak tidak hanya tiga sumbu saja (X, Y, Z), melainkan juga lima axis (X, Y, Z, U,V) dengan konfigurasi derajat kebebasan spindle tilting, dimana yang bergerak secara sumbu adalah spindelnya. Table tilting, dimana yang bergerak secara sumbu adalah meja tempat mencengkram benda kerja. Ketiga, tipe spindle dan table tilting, yaitu mesin mampu bergerak secara sumbu pada spindle dan meja tempat benda kerja. Semakin banyak konfigurasi kinematik, maka semakin rumit system control mesin tersebut. Sehingga akan berdampak pada waktu pemesinan, toleransi pemesinan, hasil kepresisian produk, dan biaya operasional.

Seiring dengan berkembangnya kemampuan processing computer, saat ini proses pemesinan sudah dapat disimulasikan terhadap produk yang ingin kita bentuk, maka diharapkan dapat mengoptimasi waktu pemesinan, banyaknya cutting tool yang terpakai, dan kecepatan pemesinan. Seluruh parameter tersebut akan mengarah kepada optimasi biaya pembuatan part. Software yang pada umumnya digunakan antara lain: Uni Graphics NX dan Powermill.

Setelah mensimulasikan program pemesinan dengan software CAM system, maka diharapkan akan mendapatkan waktu pemesinan, feed rate, dan kecepatan spindle yang optimal.

Universitas Indonesia

1.2. Rumusan Masalah

Pada laporan skripsi kali ini, akan dibahas proses pemesinan cetakan mikro atau “*micro mold*” bermaterial steel, ST 41 dengan *micro milling*. Data program pemesinan di desain menggunakan CAD / CAM software dan dilakukan proses *manufacturing “micro mold”*, serta dilakukan pula analisa pola lintasan pahat pada proses *finishing “micro mold”*. Produk hasil pemesinan akan dikomparasi dengan model CAD berdasarkan kecocokan geometri dan areal yang dimakan *cutting tool*. Sehingga akan diketahui kemampuan *software* Siemens PLM NX 8.0 untuk digunakan pada manufaktur skala dimensi mikro.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari eksperimen ini adalah melakukan pemesinan dengan mesin *micro – milling 5 axis* untuk membuat cetakan mikro dan menganalisa lintasan pahat pada proses *finishing* untuk mengetahui komparabel *software Uni Graphic* dalam pemesinan mikro.

1.4. Batasan Masalah

Beberapa batasan umum dilakukan untuk lebih mengarahkan hasil dari penelitian ini, yaitu:

1. Produk hasil pemesinan berupa *molding* bertipe *multiple use mold* berupa cetakan tipe *male* berdimensi tiga millimeter.
2. *Raw material* yang digunakan untuk pemesinan, *steel* (ST 41) dan *aluminium alloy* (AA1100).
3. Desain produk dilakukan dengan CAD *software*, dimana data yang digunakan untuk simulasi pemesinan adalah data gambar ber – ekstensi .prt. sedangkan data CL – *file* berupa .txt dan NC – *file* berupa .prg.
4. Model produk yang akan di – *machining, sculptured surface* dan logo *Android*.

5. Desain proses pemesinan milling dilakukan dengan CAM *software*, *Siemens PLM NX 8.0* dengan parameter pemesinan disesuaikan dengan katalog *cutting tool*.
6. *Feed rate* yang digunakan untuk seluruh pemesinan sebesar 1000 pps atau 1 mm/sec.
7. Proses pemesinan dilakukan menggunakan pergerakan tiga axis dan program pemesinan disesuaikan berdasarkan step *roughing*, *semi finishing*, dan *finishing*.
8. *Spindle machine tool* digerakkan dengan udara bertekanan 4 bar atau 0.4 MPa dengan kecepatan spindle rata – rata 108,232.53 RPM.
9. Analisa pola lintasan pahat operasi *finishing* dilakukan di CAD *software* dengan mendapatkan koordinat CL – *point* dan *machining tolerance* dari generalisasi *tool – path* di CAM *software*

1.5. Metodologi Penelitian

Metode-metode yang digunakan di dalam penelitian skripsi ini meliputi :

- Studi literatur berasal dari sumber buku, jurnal teknologi pemesinan mikro, referensi internet yang berhubungan dengan teori *micro milling*, dan referensi katalog *cutting tool*.
- Melakukan proses manufaktur untuk mendapatkan hasil pemesinan yang akan di tes dengan surface roughness dan foto SEM (Scanning Electron Microscope)
- Melakukan analisa dan pengambilan kesimpulan dari data- data yang telah didapat saat melakukan pengambilan data.

1.6. Sistematika Penulisan

Bentuk sistematika penulisan skripsi ini, sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Adapun isi bab pendahuluan ini, menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2. PROSES PEMESINAN CETAKAN MIKRO DENGAN *MICRO MILLING*

Pada bab dua ini, akan menjelaskan serangkaian dasar teori yang berhubungan dengan proses manufaktur cetakan mikro, dimana dimulai dari pengenalan proses dasar manufaktur cetak yang menggunakan *molding* sebagai media pencetak. Contoh aplikasi prosesnya, yaitu *injection molding*, dimana proses dan bentuk mesinnya akan dijelaskan pada sub – bab dua. Selanjutnya, akan dijelaskan proses manufaktur dari “*micro mold*”ing menggunakan operasi *Micro – Milling* beserta parameter – parameter pemesinan yang terkait, seperti pengenalan tipe *machine tool* yang digunakan untuk proses *milling machining*, *cutting parameter*, strategi pemesinan *conventional mill* dan *climb mill*, serta menjelaskan tipe material dan bentuk geometri *cutting tool* yang digunakan pada operasi pemesinan *milling*. Pada tahap sub bab dua selanjutnya, menjelaskan sistem CAD/ CAM yang digunakan selama proses pemesinan. Dimulai dari permodelan tiga dimensi yang didukung oleh *software* yang berbasis *CAD system*. Kemudian dilanjutkan dengan operasi CAM yang terdiri dari pergerakan *non cutting moves* dan *cutting moves*, pola *tool – path*, serta *surface accuracy*. Terakhir akan dijelaskan tahapan *post processor*, dimana proses tersebut mengubah data format *CL – file* menjadi *NC – file* yang diperlukan untuk proses pemesinan.

BAB III ALUR KERJA PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO

Bab tiga akan menjelaskan alur proses kerja yang dimulai dari tahapan desain model, yang terdiri dua macam. Pertama, model *sculptured surface* masing – masing ada dua tipe (*male* dan *female*). Kedua, model logo *Android* masing – masing ada dua tipe (*male* dan *female*). Adapun tujuan di desain dengan dua tipe pada masing – masing model, disebabkan pada pembuatan *mold* terdiri dari dua *part*. Part yang memiliki celah / *cavity* dan *part* yang berfungsi sebagai tutup. Untuk persiapan proses *machining*, diperlukan pemilihan *cutting parameter* (*feedrate*, *spindle speed*, *depth per cut*, dan *step over*) yang akan digunakan pada pemesinan. Selanjutnya, akan dijelaskan tahapan desain pemesinan yang dilakukan dengan *software* CAM untuk mendapatkan *tool – path* yang optimal. Kemudian pada bab tiga ini, juga menjelaskan spesifikasi *machine tool* yang digunakan beserta perangkat – perangkat yang berhubungan dengan proses *machining*, seperti *cutting tool*, *fixture* atau ragum, *material workpiece*. Selanjutnya, setelah proses pemesinan usai, dilanjutkan dengan pengambilan data hasil pemesinan secara visual, yaitu foto SEM (*Scanning Electrone Microscope*) dan Mikroskop digital.

BAB IV HASIL DAN ANALISA PROSES PEMESINAN PADA “MICRO MOLD”.

Bab empat, menjelaskan hasil dan analisa dari pemesinan yang dilakukan. Dimulai dari analisa *cutting time* selama pemesinan berlangsung (waktu aktual) dikomparasi dengan *cutting time* selama simulasi CAM (waktu teoritis). Analisa selanjutnya adalah kualitas permukaan hasil pemesinan.

BAB V ANALISA LINTASAN PAHAT OPERASI *FINISHING*

Pada bab ini, akan dijelaskan hasil dan analisa operasi *finishing* pada model *sculptured surface* tipe *male* berdasarkan jumlah *CL – point* dalam satu kurva lintasan pahat, Analisa Region dari Kurva *Machining Tolerance* dan *CL – Curved*, dan Analisa penyebaran *Cutter Contact di dalam Tolerance Band*

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT.

Bab ini berisi poin – poin kesimpulan hasil percobaan dan analisa yang telah dilakukan pada penelitian ini beserta saran untuk penelitian lebih lanjut.

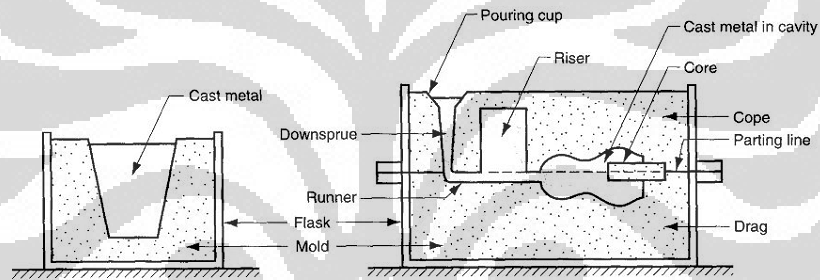


BAB 2

PROSES PEMESINAN CETAKAN MIKRO DENGAN *MICRO MILLING*

2.1. Cetakan (*molding*) Mikro

Proses cetak atau disebut *casting* sudah lama digunakan manusia untuk membuat produk mulai dari skala dimensi kecil hingga besar dan produk yang dihasilkan juga memiliki tipe rating produksi untuk skala kecil, menengah, dan massal. Untuk skala rating produksi berskala massal, lebih tepat menggunakan produksi cetak, dimana cetakan tersebut harus dibentuk dengan dua tipe *male* dan *female* sehingga terdapat *space cavity* untuk menuangkan material tuang yang akan dicetak.



Gambar 2.1 Spesifikasi geometri cetak [2]

Berdasarkan tipe pemakaian, proses cetak dibagi dua macam [2], yaitu:

- a. Expandable mold (single – use mold), merupakan mold dari hasil pengecoran (metal cair yang kemudian mengeras) harus dihancurkan untuk mendapatkan produk tersebut. Cetakan tersebut dibuat dari material pasir, plester, dan material sejenis. Nilai ekonomis dari menggunakan cetakan ini cukup murah. Contoh dari expandable mold, cetakan pasir, *investment casting*, dan *shell – mold casting*.
- b. Multiple – use mold, merupakan mold yang dapat digunakan secara berulang – ulang untuk menghasilkan produk. Material yang digunakan pembuatan cetakan antara lain logam atau grafit. Tipe cetakan ini, memiliki kelebihan dan kekurangan.

Kelebihan :

- Tidak perlu mengalami pergantian cetakan dan bersiat permanen
- Dibentuk dari dua unit cetakan, buka (*female*) dan tutup (*male*)
- Ditambah *core* untuk membentuk bagian dalam produk.

Kekurangan :

- Biaya pembuatan dies mahal dikarenakan menggunakan proses pemesinan (*milling* dan *turning*)

Pada pembahasan tugas akhir kali ini, akan lebih banyak dibahas mengenai *multiple – use mold*.

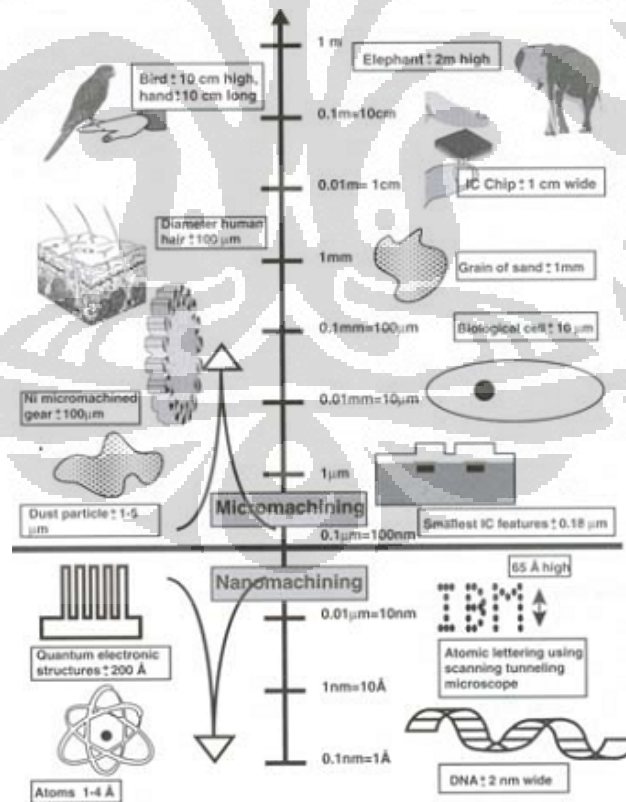
Salah satu aplikasi *multiple use – mold* digunakan pada proses *injection* molding. Merupakan proses manufaktur yang mencetak produk non metal dengan melelehkan terlebih dahulu *filler* atau peller polymer dan di injeksi memenuhi *mold cavity*. Setelah material *molten* telah beku, dilanjutkan dengan proses pelepasan part dari *molding* dan *setting* persiapan proses selanjutnya. Untuk memproduksi produk berskala mikro, dapat menggunakan “*micro mold*” sebagai cetakan untuk dipasang pada mesin *micro injection molding*, dimana proses manufaktur hampir sama dengan *injection molding* yang terdiri dari tiga tahap: (1) *Injection*, (2) *cooling*, (3) *ejection* dan *resetting* [3].



Gambar 2.2 Mesin Micro Injection Molding [4]

Material yang dapat digunakan untuk “*micro mold*”ing merupakan kelas *polymer*, seperti LCP (*Liquid Crystal Polymere*), *acetal*, *polyester*, dan *polycarbonate* [6].

Produk berskala mikro memiliki dimensi berkisar antara $0.1 \mu\text{m}$ sampai dengan 1 mm . Perlu penanganan khusus pada produk mikro, dari segi proses produksi maupun monitoring. Berbeda dengan produk makro yang dapat di monitoring dengan mata telanjang, namun inspeksi produk mikro membutuhkan minimal mikroskop dengan perbesaran 30 kali. Selain itu, proses produksi yang digunakan memerlukan ketelitian tinggi dan mahal. Diantara proses manufaktur yang dapat memproduksi produk skala mikro, antara lain *Photolithography*, *Micro EDM*, *Micro Abrasive Jet Machining*, *Micro Ultrasonic Machining*, dan *Micro Milling*. Namun, untuk memproduksi part “micro mold” hanya dapat menggunakan *Micro Abrasive Jet Machining*, *Micro Ultrasonic Machining*, *Micro EDM*, dan *Micro Milling*. Dari keempat proses tersebut, *Micro Milling* merupakan proses pemesinan mikro yang *reliable* untuk “micro mold” manufacturing, karena mampu membentuk desain yang kompleks, tingkat resiko bahaya lebih kecil, dan biaya pembuatan part lebih murah dibandingkan ketiga proses lain yang disebutkan.



Gambar 2.3 Diagram scaling [5].

Adapun, aplikasi “*micro mold*” telah banyak digunakan pada dunia *engineering*, medis, dan penerbangan. Contoh produk, dimana menggunakan “*micro mold*” seperti *micro gear*, *sensor housing* pada alat bantu pendengaran, dan konektor kabel *fiber optic*.

2.2. Proses Milling dan Parametrisasi yang Terkait

Dalam proses manufaktur *molding*, dipilih menggunakan pemesinan milling dengan alasan: pemesinan milling mampu membuat beragam tekstur dan geometri potong, dimana dengan proses manufaktur lain tidak mampu mengaplikasikannya, keakuratan dimensi mencapai toleransi ± 0.0025 mm [6], dan menghasikan permukaan yang lebih halus.

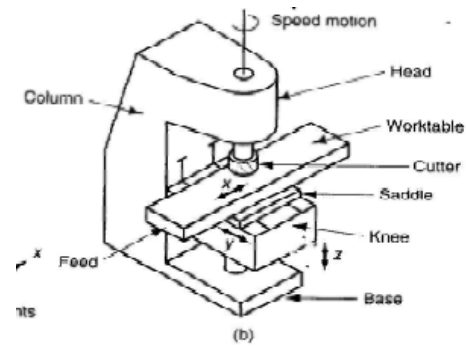
Proses pemesinan *micro milling* merupakan salah satu tipe pemesinan *non conventional*, namun secara proses pelepasan material material dan parameter pemotongan yang terkait hampir sama dengan pemesinan *conventional*. Faktor yang membedakan hanya dimensi benda kerja dan *cutting tool* serta pergerakan motor pada sumbu x, y, dan z lebih terbatas.

2.2.1. Tipe Milling Machine Tool

Proses manufaktur dengan *milling machining* menggunakan *machine tool* yang telah tersedia berbagai macam tipe berdasarkan pergerakan axis yang digunakan. Secara umum, *machine tool* untuk *milling* dibagi tiga macam berdasarkan pergerakan axis. Yaitu *machine tool* tiga axis, lima axis, 3 + 2 axis.

1. *Three axis*

Proses *milling* tiga axis menggunakan pergerakan sumbu X, Y, dan Z. ada dua tipe mekanisme *milling three axis*. Pertama, meja benda kerja yang bergerak secara sumbu X, Y, dan Z, sedangkan spindle tetap. Kedua, meja benda kerja bergerak secara sumbu X dan Y, sedangkan spindle bergerak terhadap sumbu Z.

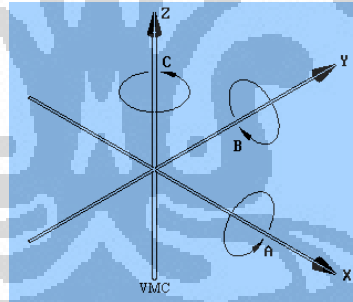


Gambar 2.4 Mesin milling 3 axis [7]

2. Five axis

Proses milling menggunakan lima derajat kebebasan, terdiri dari X, Y, Z, U (atau A), dan V (atau C). Tiga axis utama X,Y, dan Z bergerak seperti *machine tool 3 axis*, sedangkan sumbu U (atau A) rotasi satu sumbu terhadap sumbu X, sedangkan sumbu V (atau C) rotasi satu sumbu terhadap sumbu Z.

Kelima axis ini bergerak secara sinkron dan serempak dalam satu *movement* lebih dari satu axis yang bergerak.



Gambar 2.5 Sumbu axis X,Y,Z dan A,B, C [8]



Gambar 2.6 Mesin milling 5 axis [8]

3. Three and Two axis

Pada pergerakan *machine tool* ini, bergerak dominan pada tiga axis, namun sebelum bergerak secara tiga axis, spindle akan menyesuaikan posisi dengan menggerakkan salah satu sumbu *rotary*. Kemudian untuk proses selanjutnya akan dilanjutkan dengan pemesinan tiga axis. Sehingga operasi lebih menghemat waktu dan program yang dijalankan lebih mudah dikontrol dibandingkan pergerakan dengan 5 axis secara serempak.

2.2.2. Parameter Pemesinan

Dalam proses pemesinan, yang harus diperhatikan selain waktu pemesinan yaitu *cutting parameter* dan *machining strategy*. Dengan mengatur kedua aspek tersebut, maka diharapkan akan mengurangi waktu pemesinan dan mengoptimasi biaya produksi. *Cutting parameter* terdiri dari *depth of cut*, *width of cut*, *spindle speed*, dan *feed rate*. Seluruh bagian tersebut akan dijelaskan lebih detil dibawah ini.

a. Depth Per Cut (Kedalaman Pemotongan)

Besarnya kedalaman *cutting tool* melakukan pelepasan material terhadap benda kerja dengan pergerakan axial terhadap sumbu *cutting tool*.

Berikut ini contoh *datasheet* besarnya *depth per cut* pada *cutting tool* berdasarkan diameternya.

Tabel 2.1 Depth per cut dan radial of cut [9]

D_c	Slotting $a_p/D_c = 100\%$, $v_c = 180$ m/min or max RPM in machine										
	f_z	a_e	a_p	a_p ML	a_p L	a_p TL	a_p XL	a_p SL	a_p XXL	a_p XSL	
0.10	0.0013	0.16	0.032	-	-	-	-	-	-	-	
0.15	0.0020	0.15	0.048	-	-	-	-	-	-	-	
0.20	0.0026	0.20	0.064	-	-	-	-	-	-	-	
0.30	0.0039	0.30	0.096	-	-	-	-	-	-	-	
0.40	0.0052	0.40	0.128	-	-	-	-	-	-	-	
0.50	0.0065	0.50	0.160	0.100	0.040	0.030	0.019	-	-	-	
0.60	0.0078	0.60	0.192	0.120	0.048	0.036	0.023	-	-	-	
0.80	0.0104	0.80	0.256	0.160	0.064	0.047	0.031	-	-	-	
1.00	0.0130	1.00	0.320	0.200	0.080	0.059	0.038	0.032	0.013	0.006	
1.20	0.0156	1.20	0.384	0.240	0.096	0.071	0.046	-	-	-	
1.50	0.0195	1.50	0.480	0.300	0.120	0.089	0.058	0.048	0.019	0.010	
1.80	0.0234	1.80	0.576	0.360	0.144	0.107	0.069	0.058	-	-	
2.00	0.0260	2.00	0.640	0.400	0.160	0.118	0.077	0.064	0.026	0.013	

Pada table, *depth per cut* ditulis dengan simbol a_p , sedangkan untuk *radial depth per cut* disimbolkan a_e .

b. *Radial of Cut* (Jarak pelepasan material ke Samping)

Dalam *machining parameter*, biasa disebut dengan *step over*. Didefinisikan jarak antar lintasan *tool path*, dimana setiap satu lintasan *tool path* tegak lurus dengan sumbu *cutting tool*. Semakin besar nilai *step over*. Maka material yang terbuang akan semakin banyak dan waktu pemesinan semakin cepat.

c. Kecepatan Spindel

Besarnya kecepatan spindle, umumnya diukur dalam satuan *round per minute* atau RPM. Kecepatan bergantung pada kebutuhan tipe program pelepasan material terhadap benda kerja. Sehingga besarnya *spindle speed* akan berbeda untuk program *facing*, *roughing*, dan *finishing*. Selain itu, kecepatan spindel dipertimbangkan berdasarkan kemampuan putaran aktuator.

d. Feed per Tooth

Besarnya kemampuan *flute* pada *cutting tool* untuk memakan benda kerja dengan panjang per *tooth*. Besarnya nilai *feed per tooth* dipengaruhi oleh *feed rate*, jumlah *teeth*, dan kecepatan spindel.

e. Feed Rate

Merupakan kecepatan pelepasan material benda kerja oleh *cutting tool* pada jarak per satuan waktu. Dirumuskan sebagai berikut:

$$vf = fz \cdot z \cdot n \quad [10] \quad (\text{mm/menit})$$

Dimana:

- *fz* adalah banyaknya material yang dapat diambil oleh setiap *flute*. Satuan yang digunakan inc per tooth atau mm per tooth.

- Kecepatan spindel dituliskan dengan n satuan *round per minute* (RPM).
- Jumlah *teeth* pada *cutting tool* di simbolkan z .

Efek yang terjadi pada pemesinan, bila *feed rate* tinggi, maka tingkat kekasaran permukaan benda kerja akan semakin tinggi pula, berbanding terbalik dengan waktu pemesinan yang semakin cepat.

f. Kecepatan Pematangan (*Cutting Speed*)

Kecepatan *cutting tool* pada salah satu *teeth* yang bergerak dengan jarak tertentu per satuan waktu. Dirumuskan sebagai berikut:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad [10]$$

Dimana :

- $V_c = \text{cutting speed}$ (m/menit)
- $D = \text{diameter cutting tool}$
- $n = \text{kecepatan spindel dalam RPM}$

faktor yang mempengaruhi *cutting speed* diantaranya: tipe material benda kerja dan *cutting tool*, dan system pendinginan (*cooling*).

g. *Material Removal Rate* (MRR)

Merupakan banyaknya material yang termakan selama proses *cutting* dalam bentuk volume per satuan waktu. Dirumuskan sebagai berikut:

$$MRR = w \cdot d \cdot V_f \quad [7]$$

, dimana; $W = \text{width of cut}$ (mm); $d = \text{kedalaman pelepasan material}$ (mm); $V_f = \text{feed rate}$ (mm/men)

Waktu pemesinan merupakan dampak dari *cutting parameter*. Lamanya waktu pemesinan dihitung berdasarkan jumlah jarak *approaching* dan jarak lintasan pelepasan material per satuan *feed rate*.

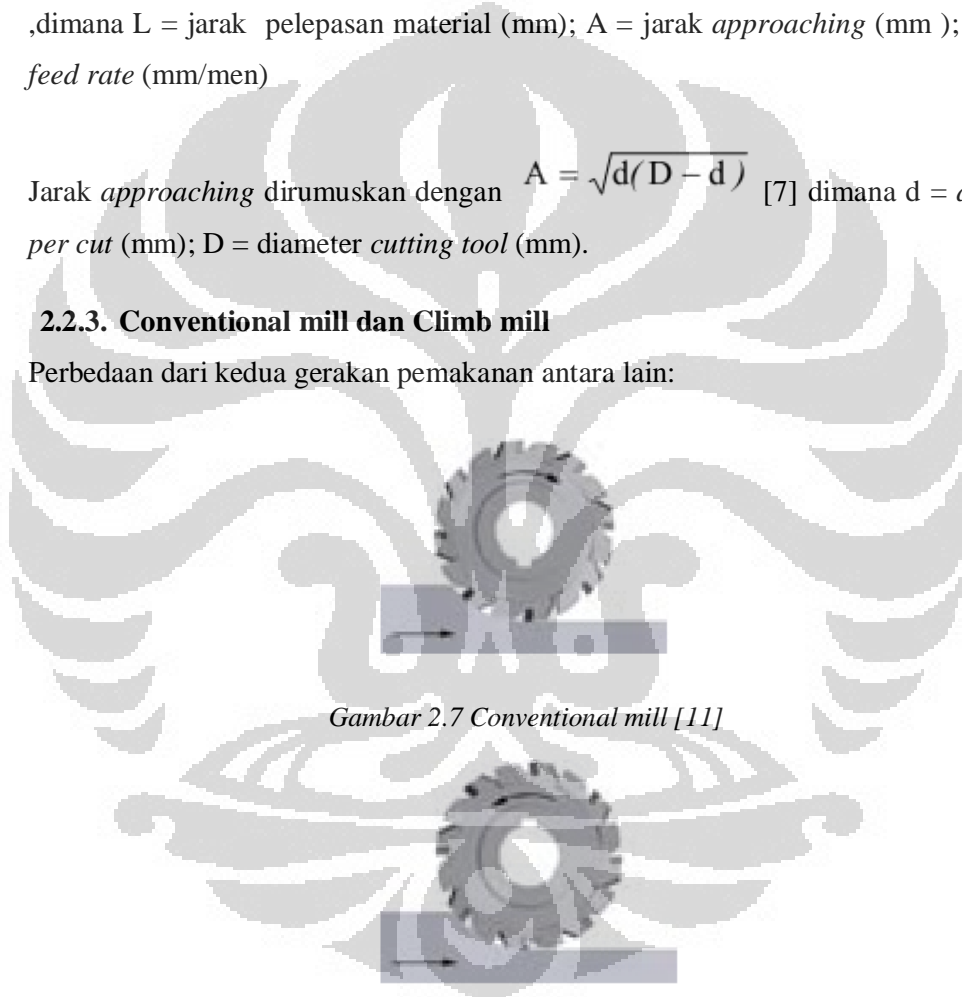
$$t_m = \frac{L + A}{V_f} \quad [7]$$

,dimana L = jarak pelepasan material (mm); A = jarak *approaching* (mm); V_f = *feed rate* (mm/men)

Jarak *approaching* dirumuskan dengan $A = \sqrt{d(D - d)}$ [7] dimana d = *depth per cut* (mm); D = diameter *cutting tool* (mm).

2.2.3. Conventional mill dan Climb mill

Perbedaan dari kedua gerakan pemakanan antara lain:



Gambar 2.7 Conventional mill [11]

Gambar 2.8 Climb mill [11]

Pada *conventional mill* (biasa disebut *up milling*) maksimum *chip thickness* berada di akhir pemotongan [11]. Kelebihan dan kekurangan dari metode pemakanan ini [11].

Kelebihan:

- Proses pemesinan halus didukung oleh *cutter teeth* yang tajam.
- Kontaminasi pada *workpiece* tidak akan mempengaruhi *tool life*.
- *Tool engagement* tidak akan mempengaruhi karakteristik *machined surface*.

Kekurangan:

- *Tool* cenderung bergetar
- *Workpiece* cenderung bergerak ke atas, sehingga dibutuhkan mekanisme *clamping* yang kuat
- Membutuhkan *power* yang lebih untuk meningkatkan gesekan karena *chip* telah terbentuk saat awal pemakanan.
- Hasil *finished surface* cenderung akan rusak oleh gesekan *chip* yang telah ada saat awal pemakanan.
- *Cutting tool* lebih cepat aus dibandingkan gerakan *climb mill*.

Pada *Climb mill*, atau biasa disebut *down mill*, bergerak saat ketebalan *chip* minimum. Kelebihan dan kekurangan gerakan ini sebagai berikut.

Kelebihan :

- *Tool life* lebih awet (mencapai 50 % dari pemakaian *conventional mill*) [11].
- Mendukung *finishing* pada *surface*, karena *chip* paling tebal terbuang saat *cutting tool* berputar menjauhi *workpiece*.
- *Climb milling*, mengurangi kesulitan *clamping* untuk menjepit, sehingga gaya tahan yang diperlukan tidak terlalu besar.

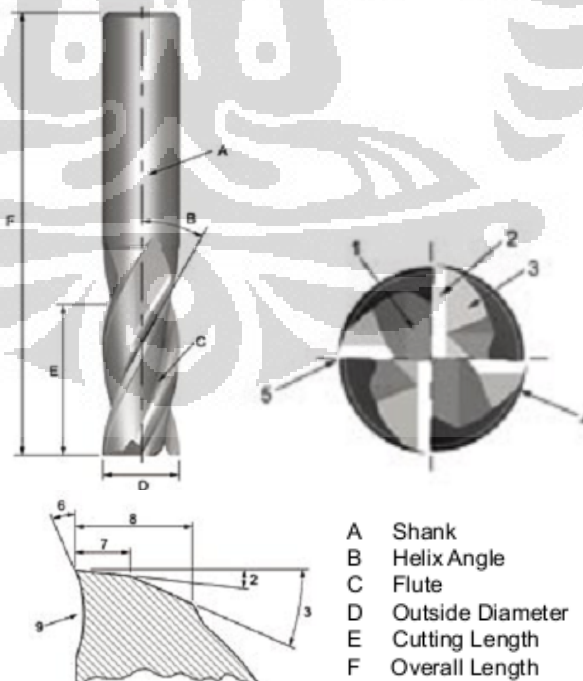
Kekurangan :

- *Climb mill* tidak cocok untuk *machining workpiece* yang memiliki *surface scaled*, seperti *hot – worked metal*, *forging*, dan *casting*. *Scale* atau kerak akan mengurangi *tool life*.

- Karena besarnya gaya impak antara *cutting tool* dan *workpiece* saat *engagement*, diperlukan pen *settingan machine tool* yang *rigid* dan efek *backlash* harus seminimal mungkin.

2.2.4. Mata Pahat Potong (*Cutting Tool*)

Dalam proses pemesinan khususnya pemesinan milling, *cutting tool* merupakan parameter yang banyak diperhatikan dalam proses pemesinan. Pada proses *roughing*, *cutting tool* harus mampu memakan material benda kerja sebanyak – banyaknya hingga batas *part stock* untuk proses *finishing*. Pada proses *finishing*, *cutting tool* harus mampu memakan sisa kedalaman *part stock* dan menghaluskan permukaan untuk akhir proses pemesinan. Pada proses *finishing* dan *semi finishing*, menggunakan *cutting tool* tipe *ball end* [Choi and Jerard, 1998], dimana ujung permukaan menyerupai bola yang mampu *contact* dengan *surface* benda kerja hingga sudut kemiringan tertentu. Sedangkan, pada proses *roughing* dan *facing*, menggunakan *cutting tool* *flat end mill* [Choi and Jerard, 1998].



1	Gash	6	Rake Angle
2	Primary Relief Angle	7	Width of Primary Relief Land
3	Secondary Relief Angle	8	Width of Secondary Relief Land
4	Heel	9	Undercut Face
5	Cutting Edge		

Gambar 2.9 Spesifikasi bagian cutting tool [11]

Berikut ini tipe – tipe material *cutting tool*: [12]

1. Carbon Steel

Baja ini mengandung 0.6 – 1.5 % karbon dengan campuran sedikit silicon, chromium, dan vanadium. Kekerasan material ini mencapai HRC 62, sehingga material ini terkenal cepat aus dan tingkat kekerasan rendah.

2. High Speed Machining

Merupakan baja alloy yang mengandung vanadium, cobalt, molybdenum, tungsten, dan chromium. Melalui proses *heat threatment* hingga kekerasannya mencapai range HRC 63 – 65. Penambahan material Cobalt memberikan kekerasan yang lebih baik dibandingkan material *carbon steel*.

3. Cemented Carbide

Material ini diproses melalui metode *powder metallurgy* dan sintering dengan material *tungsten carbide* (WC), *cobalt* (Co) *matrix*.

4. Ceramic

Material ini dikenal memiliki tingkat kekerasan tinggi mencapai sifat *brittle*. Material pencampuran terdiri dari aluminium oksida (Al_2O_3). Berdasarkan proses pengerjaan, dibagi dua kategori:

- a. Keramik dengan *cold – pressed*, terdiri dari Al_2O_3 *cold pressed* yang dimasukkan kedalam proses dan di sintering pada temperature tinggi.
- b. Keramik dengan *hot – pressed* atau biasa disebut *cermet*. Mengandung 70 % Al_2O_3 dan 30% TiC.

Sifat dari kedua material di atas memiliki tingkat ketahanan aus lebih baik namun *brittle*. Sehingga *cutting tool* dengan material tersebut direkomendasikan untuk pemesinan material *cast iron* dan *steel*.

5. Cubic Boron Nitride (CBN) dan *synthetic diamond*

CBN merupakan material memiliki tingkat kekerasan tinggi dan umumnya digunakan sebagai material *coating* dari *cutting tool*. sangat baik untuk digunakan pemesinan material *ferrous*.

Untuk material *diamond*, tentunya memiliki tingkat kekerasan yang tinggi di antara seluruh material karbon. Sangat baik digunakan untuk pemesinan material non – *ferrous*.

2.3 Proses Manufaktur Menggunakan sistem CAD / CAM

2.3.1. Permodelan Tiga Dimensi

Tahap awal dari operasi manufaktur adalah melakukan permodelan dengan tiga dimensi menggunakan CAD (*Computer Aided Design*) *software*. Adapun tujuan permodelan menggunakan CAD antara lain model dapat disimulasikan dengan *software* CAM (*Computer Aided Manufacturing*) maupun CAE (*Computer Aided Engineering*). Selain itu, menggunakan *software* CAD mampu mengurangi waktu kerja dan meningkatkan dinamis permodelan suatu produk. Dalam tahapan pemodelan dengan CAD *software*, menggunakan operasi modelling seperti *extrude*, *lofting*, dan *sweep*.

Secara operasi modelling, *part* yang digambar pada penelitian ini menggunakan operasi: *extrude* dan *through mesh surface*.

1. Operasi *Extrude*, merupakan bagian dari operasi pemodelan tiga dimensi untuk menghasilkan pola gambar dua dimensi menjadi tiga dimensi dengan menambah dimensi tinggi, sehingga model memiliki *body* yang dapat diinterpretasikan pada sistem koordinat tiga dimensi maupun dua dimensi bila hanya ingin mengedit atau melihat bagian *face body* saja.

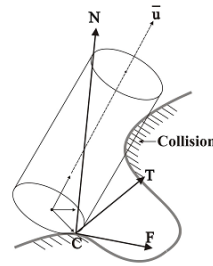
2. Operasi *Through Mesh Surface* hampir sama dengan *lofting* yang membedakan justru penggunaannya khusus untuk pembuatan *mesh curve*, berbeda dengan operasi *extrude* yang dapat digunakan untuk semua *shape*. Konsep dasar dari operasi ini, pola gambar dua dimensi minimum dua layer yang diatur sedemikian rupa hingga membentuk *surface* atau body tiga dimensi dengan menggunakan interpolasi antar dua layer dua dimensi hingga terbentuk permukaan kurva tiga dimensi.

2.3.2. Proses Perencanaan Pemesinan

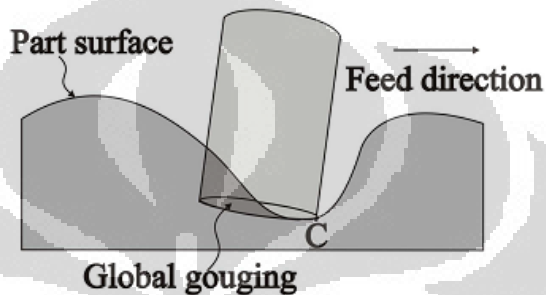
Setelah dilakukan verifikasi dan persetujuan dari model produk yang akan di *machining*, tahap selanjutnya adalah perencanaan proses pemesinan menggunakan *CAM software* untuk mendapatkan strategi pemesinan yang bebas dari *collision* dan *gauging* saat pemesinan berlangsung. Yang dilakukan oleh *CAM system* adalah *tool – path generation* akan menghasilkan serangkaian *tool path* yang bebas *collision* dan *gauging* terhadap permukaan sekitar pemotongan.

Pada *CAM system* terdapat beberapa istilah yang digunakan:

- *Tool path*
Merupakan lintasan pahat dari proses pemesinan, dimana lintasan tersebut sudah termasuk pergerakan kapan *cutting tool* harus melakukan pemotongan, menghindari tabrakan terhadap areal yang tidak dimakan, dan menuju posisi awal pemotongan.
- *Gauging dan collision*
Perbedaan antara keduanya, antara lain. *Gauging* merupakan interferensi di dalam panjang *flute cutting tool* terhadap permukaan benda kerja yang harusnya tidak masuk dalam areal *cutting* atau *overcut*. Sedangkan *collision* merupakan interferensi diluar panjang *flute cutting tool* terhadap permukaan benda kerja maupun bagian *machine tool*, seperti *fixture* atau ragam.



Gambar 2.10 Collision [18]



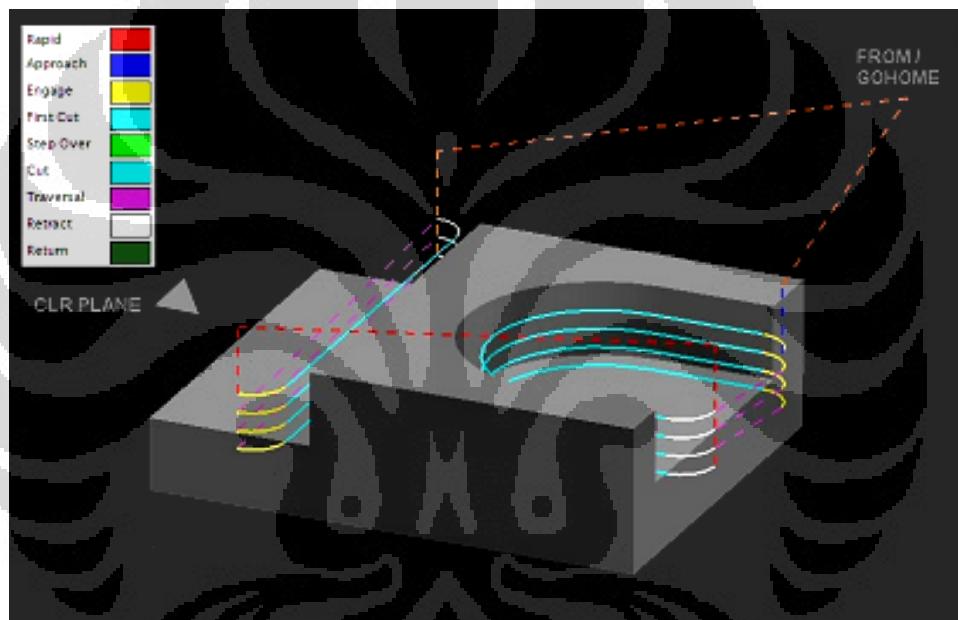
Gambar 2.11 Gauging [18]

- *Cutting moves*
Merupakan pergerakan *cutting tool* saat melakukan pelepasan material terhadap benda kerja.
- *Non cutting moves*
Pada proses pemesinan, pergerakan *non cutting moves* berada saat *cutting tool* mulai bergerak dari titik *origin* / koordinat (0,0,0) sampai menyentuh permukaan *workpiece*. Kemudian dilanjutkan saat *cutting tool* bergerak menjauh *workpiece* untuk *retract* dan *depart*. Sedangkan pergerakan *cutting moves* terjadi selama *cutting tool* melakukan pelepasan material terhadap *workpiece*. Berikut ini, akan dijelaskan *step – step* dari pergerakan *non cutting moves*

Pada tahapan pergerakan *cutting tool* milling, dimulai dari pergerakan awal *cutting tool* dari titik *origin machine tool* menuju areal *clearance* benda kerja. Tujuan dari *clearance areal*, sebagai pembatasan areal antara *step approaching* dan *engage*. *Step approaching* dimulai dari pergerakan *cutting tool* dari titik *origin machine tool* hingga menuju titik *clearance areal*. Setelah melewati *clearance areal*, *feed rate*

diperlamban hingga *cutting tool* menyentuh permukaan benda kerja. Step ini disebut *engage*. Kemudian, setelah melalui step *engage*, *cutting tool* memulai *first cut* hingga mencapai *depth per cut* yang dicapai. Step selanjutnya adalah *cutting step* hingga mencapai titik akhir pemotongan benda kerja. Saat mencapai akhir pemotongan, step selanjutnya adalah *retract*, dimana *cutting tool* bergerak menjauhi benda kerja, kemudian dilanjutkan dengan pergerakan step *depart*, yaitu *cutting tool* bergerak ke koordinat *cutting line* selanjutnya.

Seluruh step tersebut, lebih dijelaskan pada gambar dibawah ini.



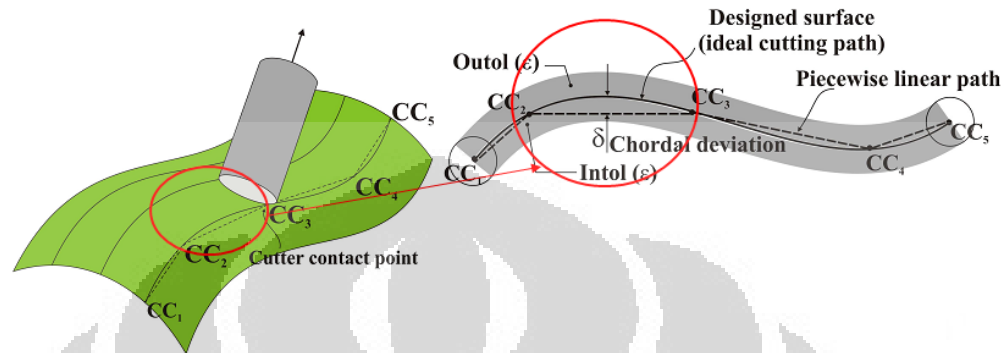
Gambar 2.12 Tipe pergerakan non cutting move [14]

- *Surface accuracy*

Bagian dari parameter pemesinan yang mempengaruhi tingkat kepresisian hasil pemesinan / produk yang telah di machining tentu mempunyai toleransi yang ditentukan seiring dengan kebutuhan dan dimensi produk tersebut. Semakin besar dimensi produk yang dibuat maka toleransi akan semakin besar pula atau lebih kasar dibandingkan memproduksi produk yang berdimensi kecil dimana lebih membutuhkan tingkat toleransi yang lebih presisi, khususnya pada proses manufaktur dengan produk berskala mikro.

- *Machining Tolerance*

Berdasarkan gambar dibawah ini, akan dijelaskan bagian – bagian utama dari *machining tolerance*:



Gambar 2.13 Machining tolerance [13]

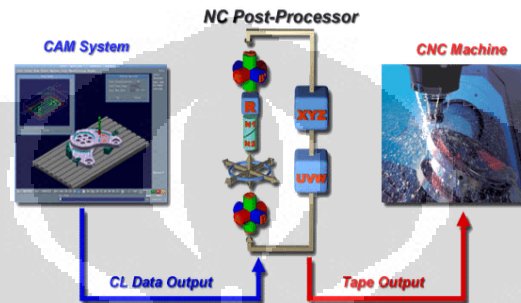
Pada gambar terdiri dari tiga komponen penting, yaitu:

- *Outol*, besarnya toleransi yang diberikan terhadap *surface* yang didesain ke arah luar kurva.
- *Intol*, besarnya toleransi yang diberikan *surface* desain ke arah dalam kurva. Kedua (*intol* dan *outol*) aspek bila digabungkan akan menghasilkan areal toleransi sepanjang *surface* yang dinamakan *tolerance band*.
- *Chordal deviation*, besarnya tingkat deviasi antara *kurva* yang di desain dengan kurva hasil pemesinan, dimana kurva hasil pemesinan tersebut dihasilkan dari penarikan garis dari tiap poin – poin *cutter contact* pada *surface*.
- CC atau *cutter contact*, posisi persinggungan antara *cutting tool* dengan *surface* dan di interpretasikan dalam bentuk titik / *point* pada *surface* sehingga dapat diketahui posisinya. Syarat utama dalam proses pemesinan, untuk mencapai tingkat akurasi produk yang di inginkan, pastikan nilai *cutter contact* berada di dalam areal *tolerance band*.

2.3.3. *Post Processor*

Setelah program pemesinan telah disetujui dan siap digunakan untuk proses *machining*, tahap selanjutnya adalah mengkonversi data CL – *file* menjadi NC *file* menggunakan *post processor*. Yaitu sejenis perangkat lunak yang

berfungsi sebagai mengubah data bertipe CL – *file* menjadi NC – *file*. Data CL masih berbasis koodinat dari software CAM, dimana terdiri dari koordinat pergerakan *cutting tool* yang telah di generalisasikan melalui CAM *software*. Sedangkan NC – *file* sudah berbasis koordinat dan kode fungsi pergerakan dari *machine tool*. data yang di eksekusi oleh controller motor CNC adalah data NC – *file*. Setelah mendapatkan data NC – *file*, maka proses pemesinan siap dilakukan.

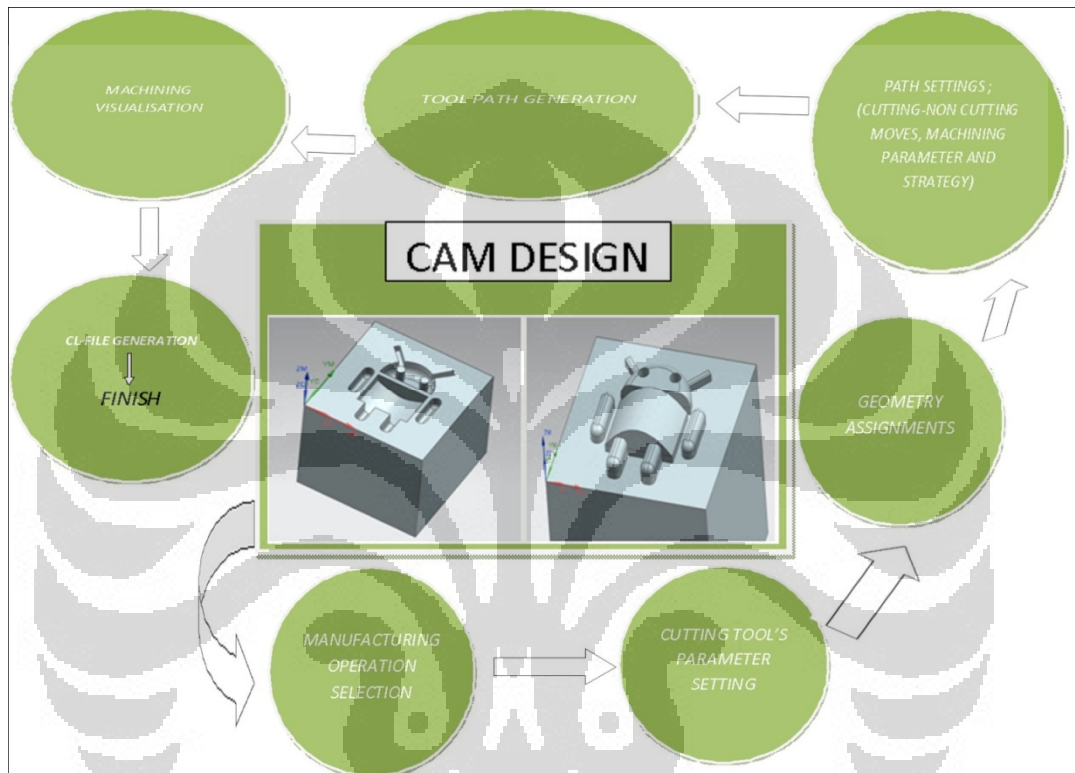


Gambar 2.14 Posisi post processor berada di antara CAD - CAM system [15]

BAB 3

ALUR KERJA PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO

Secara garis besar, *working flow* penelitian ini digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Alur Proses kerja

Pertama, dilakukan pemilihan desain berdasarkan kebutuhan penelitian dan terdapat parameter yang dapat dijadikan bahan analisa. Dari hasil diskusi, didapatkan konsep desain seperti permukaan bergelombang dimana terdapat satu bukit dan satu lembah. Adapun tujuan dari geometri desain ini, untuk mengetahui jumlah CL – file dari kurva di setiap posisi yang berbeda. Setelah desain ditentukan, dilanjutkan dengan *modelling* tiga dimensi menggunakan *software* Siemens PLM NX. *Modelling* tersebut disimulasikan proses pemesinan dengan *CAM software*, Siemens PLM NX. Dari simulasi tersebut didapatkan generalisasi data CL –file yang terdiri dari koordinat pergerakan *cutting tool* berbasis *CAM software*. Kemudian, data CL- file

diubah menjadi format NC – file, dimana koordinat system tersebut berbasis *machine tool*. Setelah itu, dilakukan *upload* data NC – *file* ke kontrollor motor CNC dan proses pemesinan pun siap dijalankan.

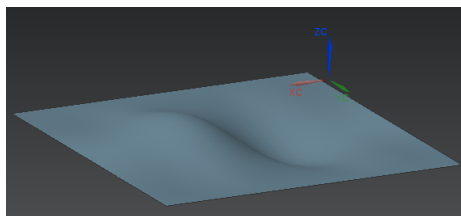
Pada tahap awal penelitian, dilakukan proses pemesinan pada dua model yang berbeda. Pertama model *male* dan *female part* dengan *sculpture surface*. Model kedua, desain logo *Android* berkontur timbul atau tipe *male* dan berkontur ke dalam atau tipe *female*. Adapun tujuan dari pembuatan model *sculpture surface* adalah untuk menganalisa pola lintasan pahat saat proses *finishing*. Sedangkan pembuatan logo *Android* untuk mengetahui kemampuan *machine tool* untuk membuat suatu produk berskala mikro dengan desain yang sudah dikenal banyak orang.

3.1. Tahapan Desain CAD

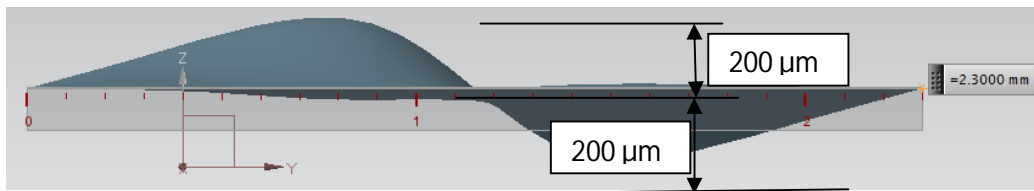
Pada tahap desain bentuk permukaan benda kerja, ada beberapa faktor yang diperhatikan: dimensi maksimum dari benda kerja, optimasi pemakaian *cutting tool* hingga aus, dan diameter *cutting tool* yang digunakan. Desain *part* terdiri dari dua macam, yaitu *sculpture surface* dan logo *Android*. Dalam pembuatan permodelan tiga dimensi menggunakan CAD – CAM *software*, Siemens PLM NX 8.0

3.1.1. Desain Model *Sculpture Surface*

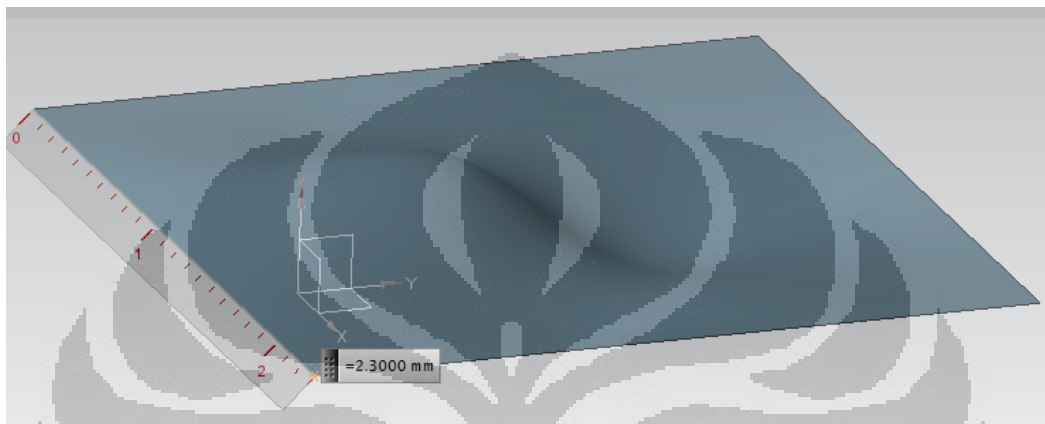
Tipe desain permukaan benda kerja pertama adalah permukaan yang bergelombang, dimana terdiri dari satu bukit dan satu kawah. Adapun tujuan dari desain ini adalah mengetahui kemampuan *milling machine tool* membentuk permukaan yang bergelombang sedemikian rupa pada pergerakan tiga axis.



Gambar 3.2 Permukaan kurva *sculpture surface*



Gambar 3.3 Tampak Samping *Sculptured Surface*

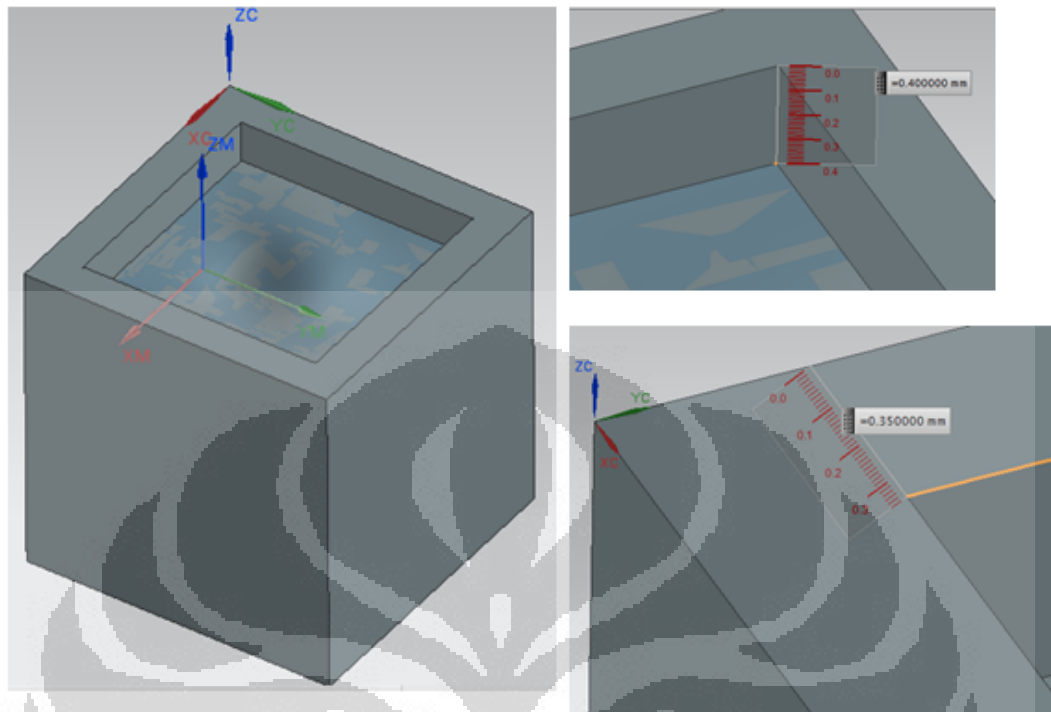


Gambar 3.4 Tampak isometri *Sculptured Surface*

Dimensi *raw material* sebesar 3 mm x 3 mm x 3 mm berbentuk kubus. Desain yang akan di *milling* terdiri dari dua macam *part*, *male* dan *female*. Berikut ini akan dijelaskan lebih detail karakteristik desain dari tiap *part* yang akan diuji.

1. *Female part*

Pada proses desain *part female*, dimana karakteristik desain yang paling utama terletak pada *pocket* di tengah benda kerja. Dimensi *pocket* sebesar 2.3 mm x 2.3 mm dengan kedalaman 0.6 mm dari permukaan atas

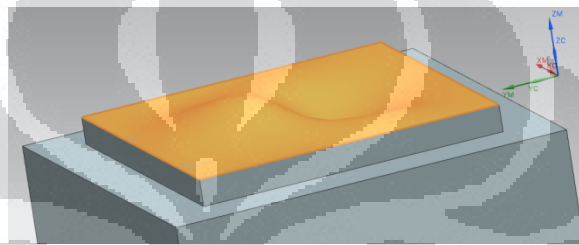


Gambar 3.5 Female part

sampai dasar kawah. Ketinggian bukit sebesar $200\mu\text{m}$ begitu pula kedalaman kawah juga disamakan. Panjang kurva pada bagian tengah sebesar 2.3 mm dan kurva bagian pinggir tembok memiliki permukaan datar. Pada proses gambar di *CAD software*, terlebih dulu menggambar kurva single dengan ketebalan $200\mu\text{m}$ dari garis tengah kurva, sehingga masing – masing tinggi puncak dan lembah sebesar $200\mu\text{m}$. kemudian dilanjutkan dengan pembuatan dua kurva di masing – masing ujung kurva single, sebagai parameter penyearah pada saat operasi *through curve mesh* untuk membentuk permukaan yang bergelombang. Proses terakhir, yaitu operasi *through curve mesh* dengan parameter geometri terdiri dari kurva *single* dan kedua kurva di kedua ujung kurva *single*. Setelah terbentuk *surface concave –convex* (kurva bukit – kawah) dilanjutkan gambar *rectangle* berdimensi 3 mm x 3 mm dengan *offset plane sketch* sebesar $400\mu\text{m}$ dari garis tengah kurva *single*. Setelah itu, dilanjutkan dengan operasi *extrude* pada geometri *rectangle* sebesar 3 mm ke arah sumbu $-z$. Sehingga terbentuk *pocket* dengan dasar *concave – convex surface*. Hasil akhir berupa *part mold female sculptured surface*.

2. *Male part*

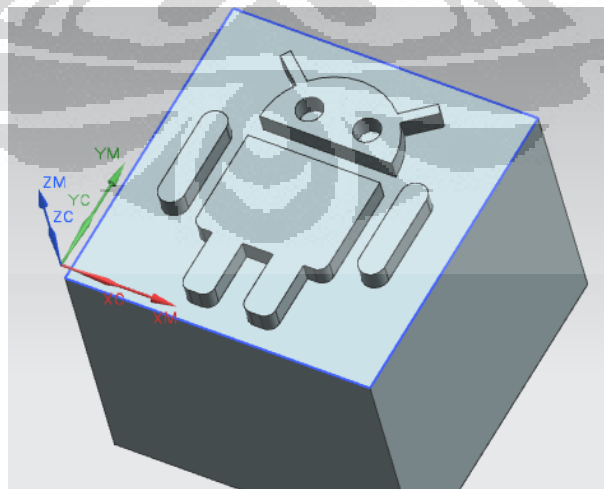
Desain dasar *sculptured surface* tipe *male* sama dengan *female part*, yang membedakan adalah surface tersebut di *extrude* ke arah $z+$, sehingga terbentuk permukaan kurva yang ter – *emboss* ke atas dari permukaan datar *raw material*. Saat penggabungan antara *female part* dan *male part* terdapat *cavity space* yang sengaja disisakan untuk ruang pengisian material cetak dengan kedalaman sebesar $100\ \mu\text{m}$.



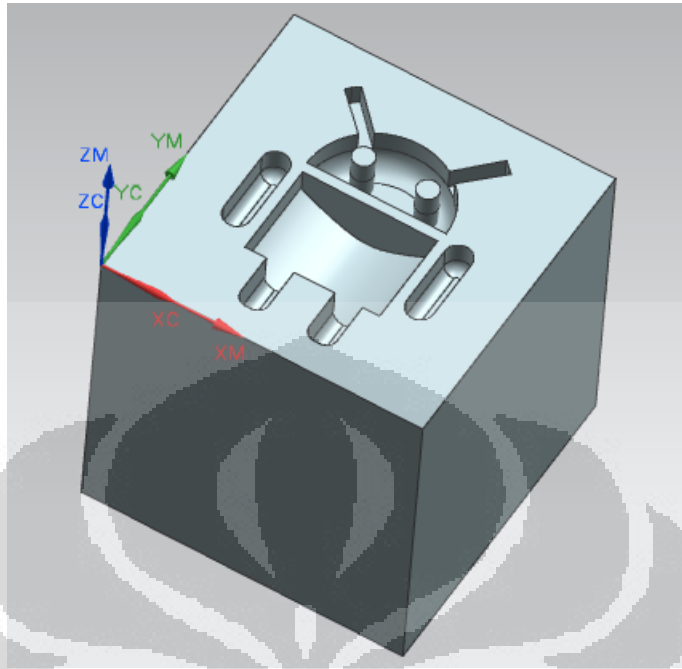
Gambar 3.6 Male Part

3.1.2. Desain logo *Android*

Desain ini terdiri dari tiga bagian utama : kepala, badan – kaki, tangan. Antara badan dan kaki merupakan kesatuan desain utama seperti gambar disamping ini. Logo tersebut di olah kembali menjadi model tiga dimensi dengan CAD *software*.



Gambar 3.7 Male part Android



Gambar 3.8 Female part Android




Ketinggian objek sebesar $200 \mu\text{m}$ dari permukaan datar benda kerja. Sedangkan luas areal keseluruhan dari model tidak lebih dari 5.72 mm^2 dari luasan total benda kerja sebesar 9 mm^2 . Sedangkan untuk *female part* memiliki kedalaman maksimum sebesar $500 \mu\text{m}$.

3.2. Pemilihan Cutting Parameter proses pemesinan

Sebelum dimulainya proses pemesinan, dimana bagian yang terpenting adalah menentukan nilai *cutting parameter* yang terdiri dari *depth per cut*, *feed rate*, *spindle speed*, dan *cutting speed*. pemilihan *cutting parameter* berdasarkan katalog cutting tool SECO, dimana spesifikasi yang tersedia sebagai berikut.

- Untuk material *workpiece steel* (SMG 1-2) dan *workpiece aluminium* (SMG 16) [9]

Tabel 3.1 Cutting parameter untuk proses pemesinan [9]

SMG	Coolant	$a_p \times D_c$	$a_e \times D_c$	v_c (m/min)		Copy milling roughing D_c (mm)									
						0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	
1-2	M/E/A	0,60	0,05	400 (350-450)		n (rev/min)	1273240	848830	636620	424410	318310	254650	212210	159150	127320
						f_z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,016	0,020
						v_f (mm/min)	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095
16	E/M/A	0,75	0,10	500 (450-550)		n (rev/min)	1591550	1061030	795770	530520	397890	318310	265260	198940	159150
						f_z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,016	0,020
						v_f (mm/min)	6365	6365	6365	6365	6365	6365	6365	6365	6365

Berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan pada kecepatan spindle per menit (dijelaskan pada subbab 3.4.5) yaitu **108, 232.53 RPM**.

1. Perhitungan feed rate

Untuk pemesinan material *steel*, berdasarkan table *cutting tool* SECO, didapat nilai rekomendasi RPM, feed per tooth, dan feed rate sebagai berikut.

Tabel 3.2 cutting parameter tiap cutting tool

	Material Workpiece Steel			
	Diameter Cutting tool (mm)			
	0.1	0.2	0.5	2
Spindle Speed	1,273,240 RPM	636,620 RPM	254,650 RPM	63,660 RPM
Feed per tooth	0.004 mm	0.002 mm	0.01 mm	0.04
Feed rate	5,095 mm/ men	5,095 mm/ men	5,095 mm/ men	5,095 mm/ men
	Material Workpiece Aluminium			
	Diameter Cutting tool (mm)			
	0.1	0.2	0.5	2
Spindle Speed	1,591,550 RPM	795,770 RPM	318,310 RPM	7,958
Feed per tooth	0.002	0.004	0.01	0.004
Feed rate	6,365 mm/men	6,365 mm/men	6,365 mm/men	6,365 mm/men

Besarnya rasio antara *spindle speed* teoritis dan actual sebesar $108,232.53 \text{ RPM} / 1,273,240 \text{ RPM} = 0.085 = 8.5 \%$

Sehingga didapat besarnya feed rate untuk *cutting tool* 0.1 mm dengan *workpiece steel*:

$$0.085 \times 5,095 \text{ mm/men} = 433.075 \text{ mm/men} = \underline{\underline{7.218 \text{ mm/ sec}}}$$

Bila *feed rate* yang dipakai sebesar **1 mm/sec**, maka *cutting tool* masih dapat digunakan secara optimal dengan mempertimbangkan *tool life* dan mengurangi resiko *built up edge*.

2. Perhitungan *depth per cut*

Berdasarkan rumus di buku *cutting tool SECO catalogue*, besarnya nilai *depth per cut* sebesar 0.6 x diameter *cutting tool*, sedangkan besarnya nilai *step over* sebesar 0.05 x diameter *cutting tool*. Rumus ini digunakan khusus material *workpiece steel*.

Untuk *cutting tool* 0.1 mm, besarnya *step over* dan *depth per cut* yang dapat digunakan sebesar :

$$\text{Depth per cut} = 0.6 \times 0.1 \text{ mm} = \mathbf{0.06 \text{ mm} = 60 \mu\text{m}}$$

$$\text{Step over} = 0.05 \times 0.1 \text{ mm} = \mathbf{0.005 \text{ mm} = 5 \mu\text{m}}$$

Sehingga besarnya *depth per cut* dan *step over* yang dapat digunakan sebesar 0.06 mm dan 0.005 mm. kurang dari nilai tersebut masih dikatakan **aman** untuk digunakan pada proses pemesinan.

3.3. Tahapan Desain Program Pemesinan CAM dengan Model *Sculptured Surface* dan Logo *android*.

Dalam proses pemesinan tipe model, dilakukan dengan dua tipe material, yaitu Aluminium Alloy (AA 1100) dan *steel* (ST 41). Dimana untuk pemesinan *Sculptured Surface*, *workpiece steel* digunakan untuk pemesinan model *Sculptured Surfaced tipe male* dan *female*. Sedangkan *workpiece aluminium* digunakan untuk pemesinan model *Sculptured Surface tipe male* saja. Untuk proses pemesinan logo Android. Menggunakan *workpiece steel*. Pada bab ini akan dijelaskan lebih detil proses pemesinan tiap model, yaitu model *Sculptured Surfaced* dan Logo *Android*.

3.2.1. Desain Program CAM Model *Sculptured Surfaced*.

Pada bab ini akan dijelaskan lebih detail desain program pemesinan pada model *Sculptured Surfaced* pada tipe *female* dan tipe *male*. Dimana perbedaan geometri tersebut telah dijelaskan pada bab sebelumnya (bab 3.3.1). Proses pemesinan secara garis besar dibagi empat *step* yang terdiri dari : proses facing, roughing, semi finishing, dan finishing. dijelaskan pada gambar di samping, desain CAM dilakukan setelah model CAD siap untuk di machining, setelah itu, dilakukan *toolpath* generation dengan *software* CAM sehingga didapatkan CL – file yang akan diubah menjadi NC – file oleh postprocessor. NC –file di *upload* ke CNC *controller* dan proses pemensian dapat dijalankan.

3.2.2.1. Desain Program CAM pada Model *Sculptured Surface* tipe female

Proses perencanaan *tool – path* dan simulasi pemesinan dilakukan pada CAM *software*, Siemens PLM NX 8.0 untuk setiap part. Dalam tahapan pemesinan *milling*, terdapat empat step: *facing*, *roughing 1*, *roughing 2*, *semi finishing*, dan *finishing*. Proses pemesinan dari tahap *roughing* hingga *finishing* menggunakan sistem pergerakan tiga axis.

1. Perencanaan step *facing*.

Pada tahap ini, menggunakan cutting tool 2.0 mm dengan *depth per cut* 0.2 mm. Tujuan dari operasi ini, meratakan bagian atas permukaan benda kerja, sehingga, untuk step pemesinan selanjutnya, memiliki koordinat origin sumbu z yang sama untuk seluruh permukaan yang telah di – *facing*.

2. Perencanaan step *roughing 1*.

Pada tahap ini, diharapkan dapat memakan material sebanyak – banyaknya. Tipe program yang digunakan *cavity mill*. Proses pelepasan material dilakukan sebanyak tiga layer. Pada layer satu dan dua, *toolpath* yang terbentuk menyerupai radial di sebelah permukaan bukit. Pada layer ketiga, *toolpath* yang terbentuk menyerupai radial di sebelah kawah. Proses ini

menyisakan *part stock* sebesar 0.09 mm, dengan alasan untuk proses *roughing* 2 akan memakan material setebal 0.03 mm. Menggunakan *cutting tool flat end mill* berdiameter 0.5 mm.

Berikut ini data *cutting parameter* dan pola *toolpath* yang digunakan pada operasi *roughing 1*.

Tabel 3.3 komparasi nilai *ap* dan *ae* antara *actual* – teoritis untuk *workpiece steel*

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.5 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.3	0.1
Ae	0.025	0.025

Tabel 3.4 *Cutting parameter roughing 1 sculptured surface female*

Roughing operation			
Cavity mill			
Tool flat end mill 0.5 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.09	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.025	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.5 Speed factor roughing 1 sculptured surface female

Speed factors	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0006 mm
cutting speed	169.92 m/men
approach	rapid
engage	50% cut
first cut	50% cut
step over	100% cut
traversal	rapid
retract	50% cut

Tabel 3.6 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [9]

	Copy milling roughing D_c (mm)									
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	
n (rev/min)	1273240	848830	636620	424410	318310	254650	212210	159150	127320	
f_z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,016	0,020	
V_c (mm/min)	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	

Sehingga *feed rate*, *depth per cut*, *step over*, dan *cutting speed* masih dibawah spesifikasi teoritis. Maka proses pemesinan masih aman untuk dijalankan.

3. Perencanaan step *roughing 2*

Pada tahap ini, dijelaskan mengenai proses *roughing* step kedua, dimana program ini lebih difokuskan kepada pengurangan material disekitar dinding pocket dan pengurangan *z level* sisa pelepasan material *roughing 1* hingga mencapai *part stock* sebesar 0.06 mm yang disisakan untuk proses *semi finishing* dan *finishing*. Tipe program yang digunakan, *corner rough*. *Cutting tool* yang digunakan 0.2 mm, alasan penggunaan *cutting tool* tersebut mampu mencapai areal pemotongan yang lebih kecil dibandingkan dengan *cutting tool* 0.5 mm, khususnya saat melewati lintasan sekitar dasar dinding *pocket* yang berhipit dengan *part floor*, yaitu permukaan cekung – cembung. Selain itu, alasan yang lebih menguatkan adalah proses *roughing* tahap 1 menyisakan areal tidak termakan di empat titik pada pertemuan tiap dinding. Akan

beresiko, bila proses selanjutnya menggunakan *cutting tool* yang diameternya jauh lebih kecil daripada 0.2 mm, terutama saat pergerakan *engage* di areal tersebut. Dapat menyebabkan *cutting tool* semakin terdefleksi dan patah. Berikut ini data komparasi antara *depth per cut* dan *step over* antara actual dan teoritis.

Tabel 3.7 komparasi *ap* dan *ae* antara teoritis – actual untuk workpiece steel

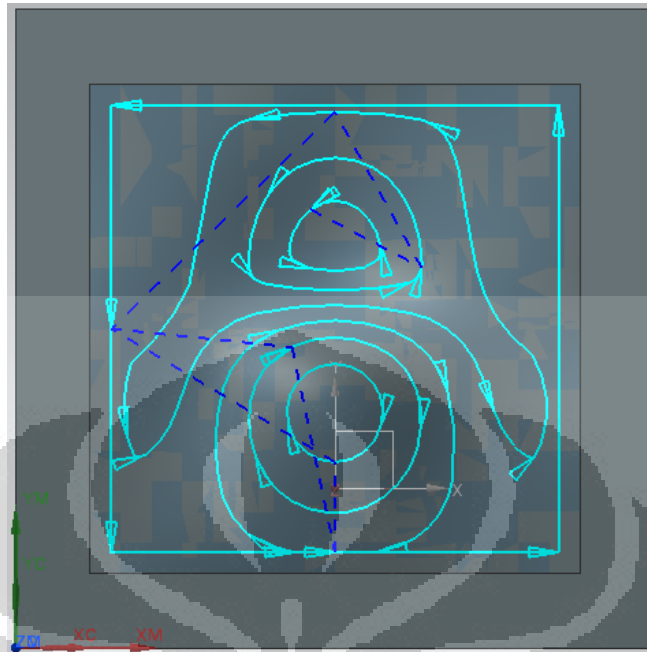
Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.06
Ae	0.01	0.005

Tabel 3.8 Cutting parameter roughing 2 sculptured surface female

Roughing operation			
Corner Rough			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Climb milling Profile pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.09	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.06	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.9 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [9]

Copy milling roughing D_c (mm)										
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	
n (rev/min)	1273240	848830	636620	424410	318310	254650	212210	159150	127320	
f_z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,016	0,020	
v_f (mm/min)	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	
n (rev/min)	1273240	848830	636620	424410	318310	254650	212210	159150	127320	



Gambar 3.9 Toolpath roughing 2 (program corner rough) model sculptured surface female

4. Perencanaan step *semifinishing*

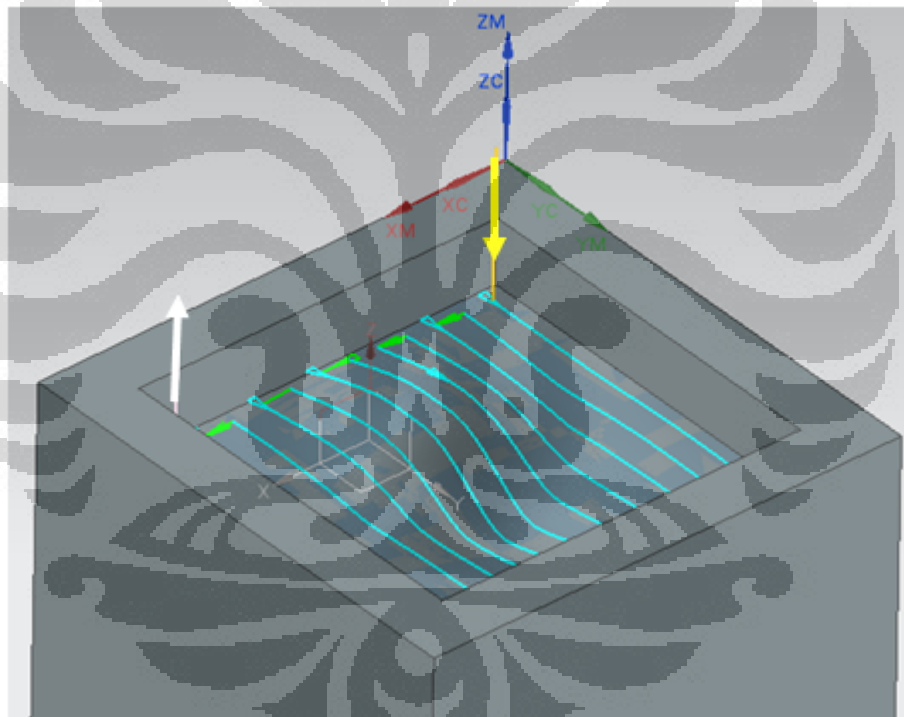
Tahap ini dilakukan sebelum proses *finishing*, dengan tujuan mengurangi *z level* permukaan setelah proses *roughing*. Sehingga ketika proses *finishing*, ketebalan pelepasan material sesuai dengan *part stock* yang didesain. Menggunakan *cutting tool flat end mill* berdiameter 0.2 mm. besarnya *depth per cut* 0.03 mm dan *step over* sebesar 0.005 mm. menyisakan *part stock* untuk proses *finishing* sebesar 0.03 mm. Tipe program yang digunakan adalah *contour areal*, dimana pergerakan menyerupai *basic program copy mill*. Yakni mengikuti kontur permukaan benda kerja dengan kedalaman pelepasan material aksial dan radial sekecil – kecilnya.

Adapun proses *semi finishing* ini akan berdampak langsung terhadap operasi *finishing*, tentunya pada bagian – bagian sisa operasi *roughing* yang menyisakan *z level surface* yang masih cukup tinggi untuk *depth per cut* proses *finishing*. Sehingga, bila proses pemesinan dilakukan tanpa melalui *step semi finishing* akan berdampak pada *tool life* dan permukaan

hasil pemesinan justru akan lebih kasar. Berikut ini komparasi *depth per cut* dan *step over* antara actual dan teoritis yang berdasarkan katalog *cutting tool SECO*.

Tabel 3.10 Komparasi nilai a_p dan a_e antara teoritis dan actual untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.12	0.03
A_e	0.01	0.005



Gambar 3.10 Toolpath semi finishing model sculptured surface tipe female

Tabel 3.11 Cutting Parameter semi finishing model sculptured surface tipe female

Semi-finishing operation			
Contour area			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Area milling drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.03	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.03	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm

Tabel 3.12 Speed factor semi finishing model sculptured surface tipe female

Speed factors (contour area 0.2 mm)	
cutting speed	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.13 Katalog RPM, feed per tooth, cutting speed [9]

Copy milling roughing D _c (mm)										
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	
n (rev/min)	1273240	848830	636620	424410	318310	254650	212210	159150	127320	
f _z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,016	0,020	
v _f (mm/min)	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	5095	

5. Perencanaan step finishing

Tahap ini merupakan akhir dari proses pemesinan, dimana permukaan hasil pemesinan hampir membentuk desain model. Pada proses ini, dilakukan

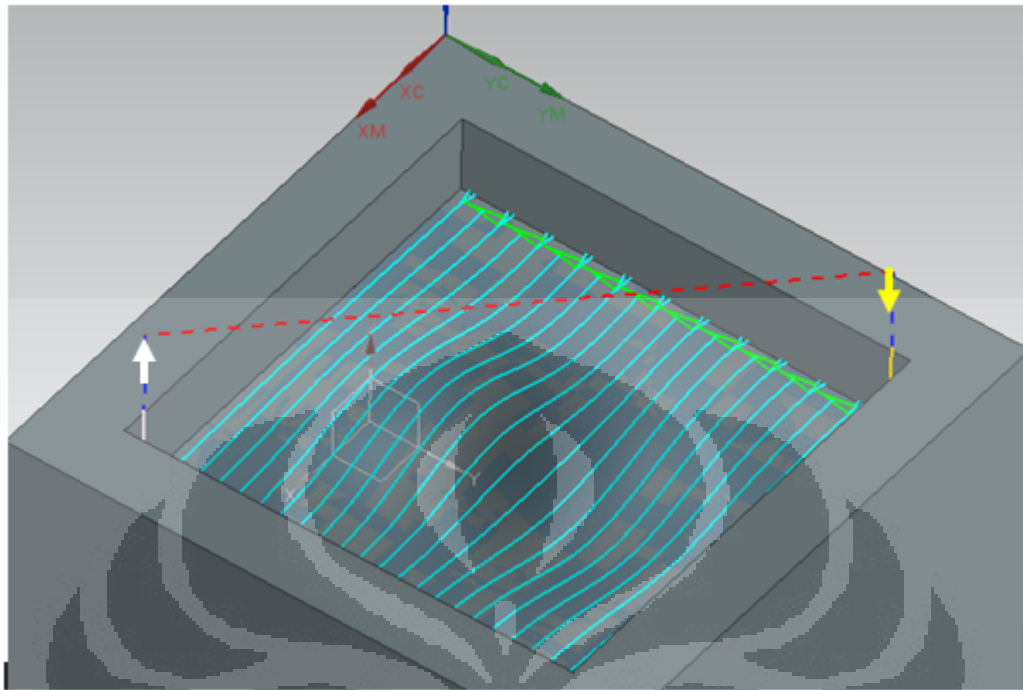
penghalusan permukaan sebesar 0.0125 mm untuk masing – masing dua *layer tool path*. Operasi ini menggunakan *cutting tool ball nose end mill* berdiameter 0.1 mm dengan alasan *cutting tool tipe ball nose end mill* , dimana kepala berbentuk *ball* mampu *contact* dengan *surface* di segala arah *vector tool axis* sehingga dapat mengikuti kontur kurva *Sculptured Surfaced* dengan smooth dan besarnya *scallop heigh* dapat diminimalisir karena pada operasi sebelumnya menggunakan *cutting tool* berdiameter 0.2 mm, sehingga tidak berbeda jauh bila menggunakan *cutting tool* berdiameter 0.1 mm.

Tabel 3.14 Komparasi nilai *ap* dan *ae* antara *actual* – *teoritis* untuk *workpiece steel*

Cutting tool type	Ball End Mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	Finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.06	0.015
Ae	0.005	0.005

Tabel 3.15 *Cutting parameter finishing model sculptured surface tipe female*

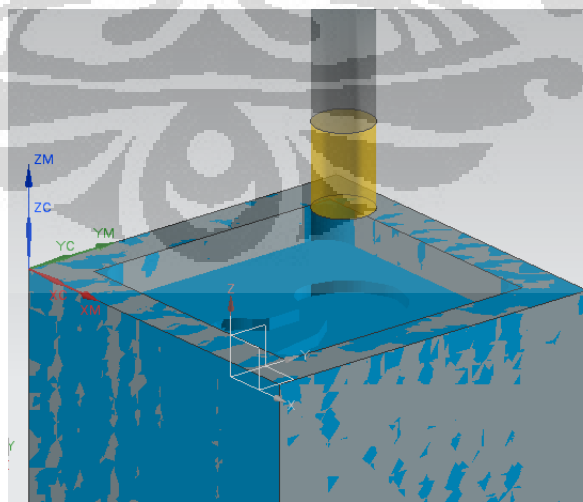
Finishing operation			
Contour area			
Tool ball-nose end mill 0.1 mm			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge200% tool
Depth per cut	0.015	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm



Gambar 3.11 Toolpath finishing model sculptured surface tipe female

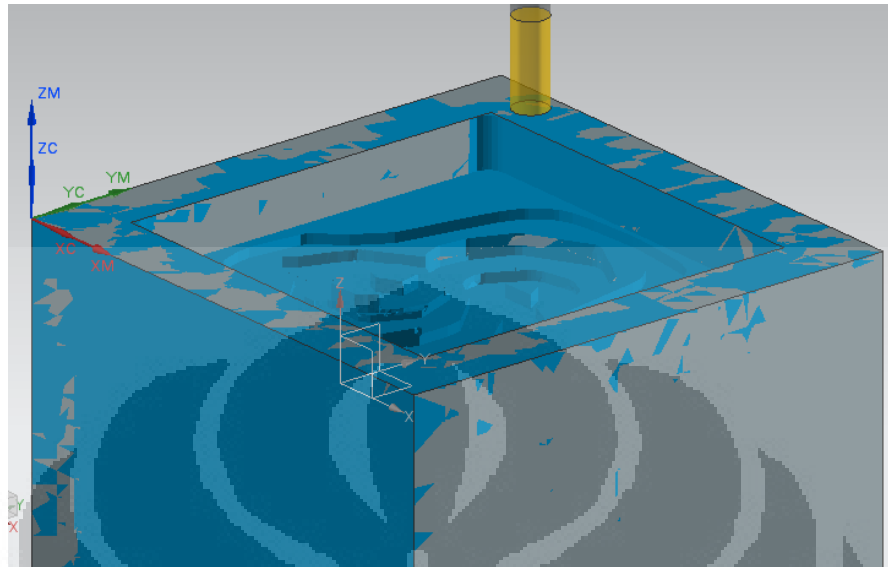
Gambar Hasil Simulasi Tiap Operasi pemesinan model *sculptured surface* tipe female

1. Hasil *Roughing 1* (program *cavity mill*)



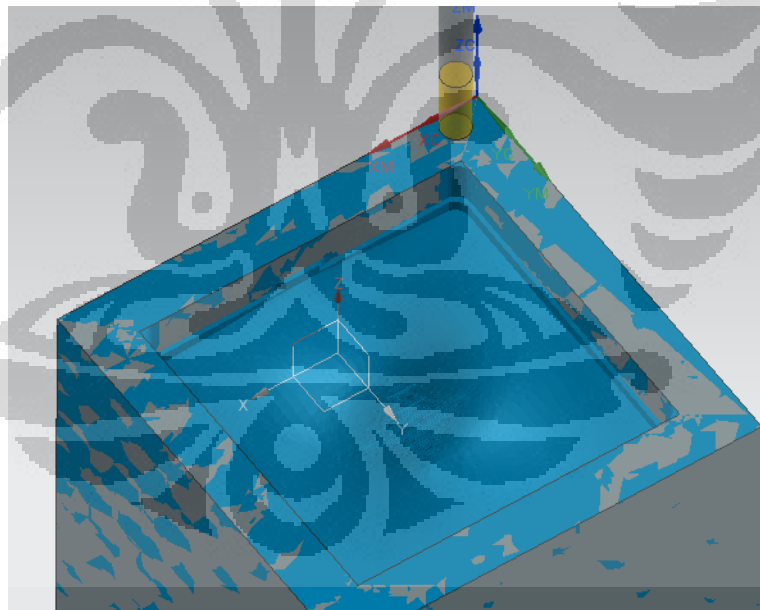
Gambar 3.12 Hasil roughing 1 model sculptured surface tipe female

2. Hasil *Roughing 2* (program *corner rough*)



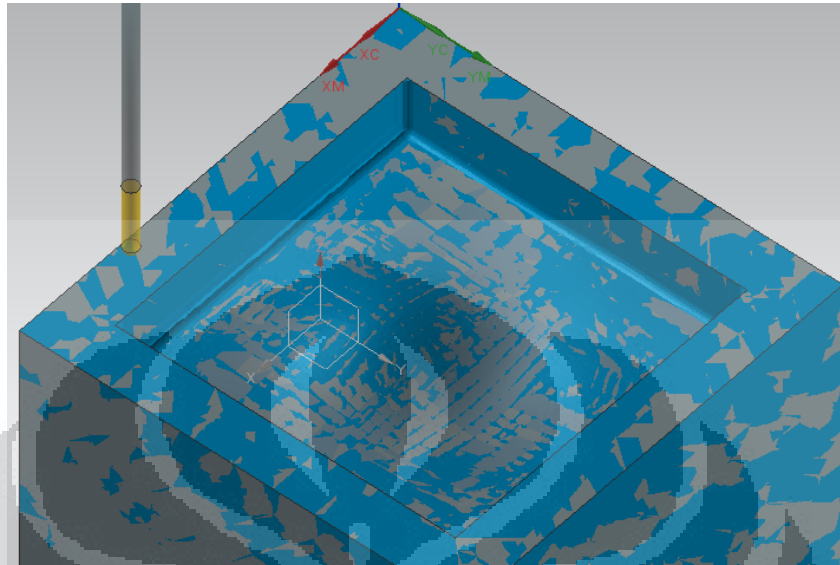
Gambar 3.13 Hasil roughing 2 model sculptured surface tipe female

3. Hasil *semi finishing* (program *contour areal*)



Gambar 3.14 Hasil semi finishing model sculptured surface tipe female

4. Hasil *finishing* (program *contour areal*)



Gambar 3.15 Hasil *finishing* model *sculptured surface* tipe *female*

3.2.2.2. Desain Program CAM pada Model *Sculptured Surfaced* tipe *male*

Perencanaan program pemesinan model ini hampir sama dengan tipe *female*. Yang membedakan justru pada bagian proses *roughing*, dimana operasi yang digunakan adalah *face milling areal* dan *z leveling*. Sedangkan *cutting tool* yang digunakan sama dengan operasi sebelumnya, yaitu pada *roughing* menggunakan 0.5 mm, *semi finishing* menggunakan 0.2 mm, dan *finishing* menggunakan 0.1 mm. bab ini akan menjelaskan lebih detail perancangan pemesinan untuk model *Sculptured Surfaced* tipe *male*. Tipe material *workpiece* yang digunakan adalah *aluminium* (AA 1100) dan *steel* (ST 41)

1. Operasi *facing*

Pada tahap ini, menggunakan *cutting tool* 2.0 mm dengan *depth per cut* 0.2 mm. Tujuan dari operasi ini, meratakan bagian atas permukaan benda kerja, sehingga, untuk step pemesinan selanjutnya, memiliki koordinat origin sumbu z yang sama untuk seluruh permukaan yang telah di – *facing*.

2. Operasi *roughing* 1

Tujuan utama dari operasi ini adalah memakan material sebanyak – banyaknya hingga kedalaman yang ditentukan. Batas kedalaman pemakan mencapai *part stock*, dimana bagian tersebut yang akan digunakan untuk *level* pelepasan material untuk proses setelah *roughing* ini. Pada operasi ini menggunakan tipe program *face milling areal*, dimana *cutting tool* yang digunakan sebesar 0.5 mm *carbide coated*. Proses *face milling areal* dimulai dari pelepasan material *level* teratas *raw material* hingga batas *part stock* untuk operasi *roughing* kedua, dimana operasi kedua tersebut untuk proses pelepasan material permukaan *Sculptured Surfaced*. Tipe pergerakan program *roughing* 1 ini berpola *planar*.

Berikut ini akan dijelaskan lebih detil *cutting parameter* dan arah tool path untuk operasi *roughing* 1.

Tabel 3.16 komparasi nilai *ap* dan *ae* actual – teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.5 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.1	0.015
Ae	0.025	0.005

Tabel 3.17 komparasi nilai *ap* dan *ae* actual – teoritis untuk workpiece aluminium

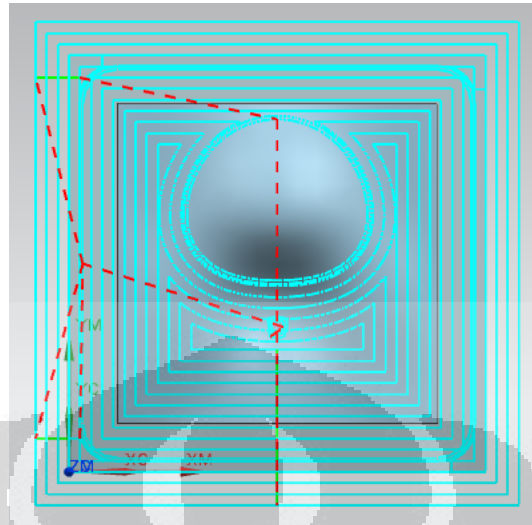
Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.0015	0.015
Ae	0.0015	0.005

Tabel 3.18 Cutting parameter operasi roughing 1 (facemilling areal) untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

Roughing operation			
Face Milling Area			
Tool flat end mill 0.5 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.025	Retract	same as engage
intol	0.002	Final retract	same as retract
outol	0.002	Clearance	1mm
Island cleanup	Yes		
wall cleanup	at start		
Finish passes added	5% tool dia stepover		
Extend to part outline	Yes		
allow undercutting	Yes		

Tabel 3.19 Speed factor operasi roughing 1 untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

Speed factors (face area mill)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	169.92 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.16 Toolpath operasi Roughing 1 (facemilling areal) model surface sculptured tipe male

3. Operasi Roughing 2

Tujuan dari operasi ini adalah membuang material sedalam *part stock* yang telah di setting untuk proses semi finishing. Operasi ini menggunakan program *z – level profile*, dimana proses pelepasan material mengikuti kontur bukit dan lembah sesuai dengan diameter *cutting tool* yang digunakan. Berikut ini, dijelaskan secara detail *cutting parameter* dan *toolpath* yang digunakan untuk operasi *roughing z level profile*.

Tabel 3.20 Komparasi nilai *ap* dan *ae* antara katalog dan actual untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.01
Ae	0.01	0.01

Tabel 3.21 Komparasi nilai a_p dan a_e antara katalog dan actual untuk workpiece aluminium

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.5 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.375	0.375
Ae	0.05	0.05

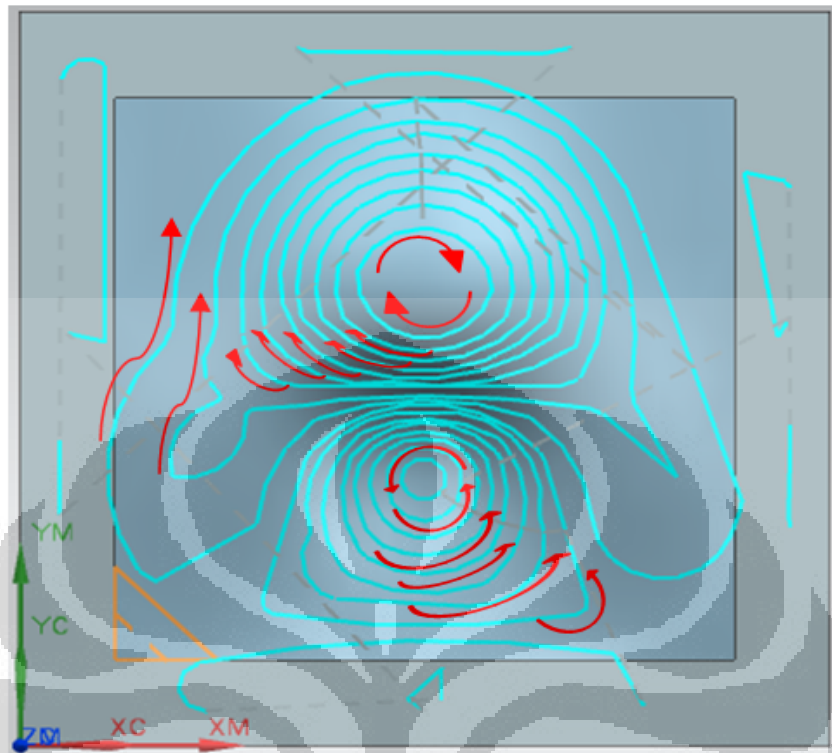
Keterangan : A_p = depth per cut; A_e = step over.

Tabel 3.22 Cutting Parameter operasi Roughing 2 untuk workpiece steel model surface sculptured tipe male

Z-level profile			
Climb milling Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.03	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.23 Speed factor operasi roughing 2 untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

Speed factors (z-level profile)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.17 Toolpath operasi roughing 2 model sculptured surface tipe male

4. Operasi Semi Finishing

Tujuan dari operasi ini adalah mengurangi *level* ketinggian sisa pelepasan material operasi *roughing* sehingga pada saat operasi finishing, level pelepasan material tidak terlalu dalam dan mengurangi resiko *cutting tool* patah. Tipe program yang digunakan adalah *contour areal*, dimana pola pelepasan material adalah parallel zig – zag. Berikut ini akan dijelaskan lebih detil *cutting parameter* dan *toolpath* yang digunakan untuk operasi *semi finishing*.

Tabel 3.24 Komparasi nilai a_p dan a_e antara actual – teoritis untuk workpiece steel.

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Semi Finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.005
Ae	0.01	0.01

Tabel 3.25 Komparasi nilai a_p dan a_e antara actual – teoritis untuk workpiece aluminium.

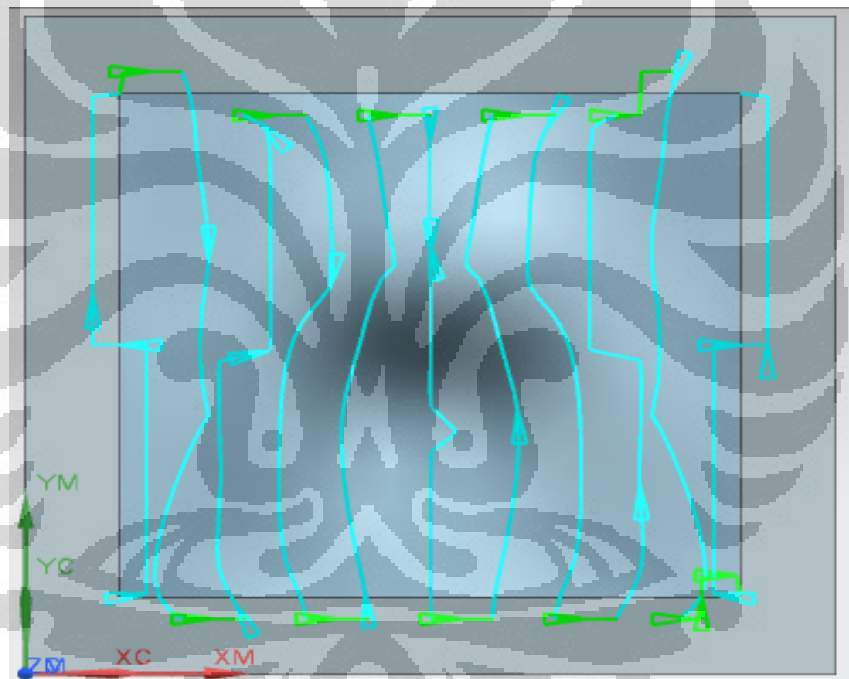
Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.15	0.15
Ae	0.02	0.02

Tabel 3.26 Cutting parameter operasi semi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

Semi-finishing operation			
Contour area			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.025	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.005	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.27 Speed factor operasi semi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

Speed factors (contour area 0.2 mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.18 Toolpath operasi semi finishing model sculptured surface tipe male

5. Operasi Finishing

Tujuan dari operasi ini adalah menghaluskan permukaan hasil *roughing* dan membuat toleransi geometri pada benda kerja sesuai yang diinginkan, sehingga pada proses ini parameter *machining accuracy* dan pemilihan pola *toolpath*

sangat penting untuk diperhitungkan. Berikut ini penjelasan detail *cutting parameter* dan *pola toolpath* yang digunakan untuk operasi *finishing* ini.

Tabel 3.28 Komparasi nilai a_p dan a_e antara *actual* – *teoritis* untuk *workpiece steel*

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	Finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.0125
Ae	0.01	0.005

Tabel 3.29 komparasi nilai a_p dan a_e antara *actual* – *teoritis* untuk *workpiece aluminium*

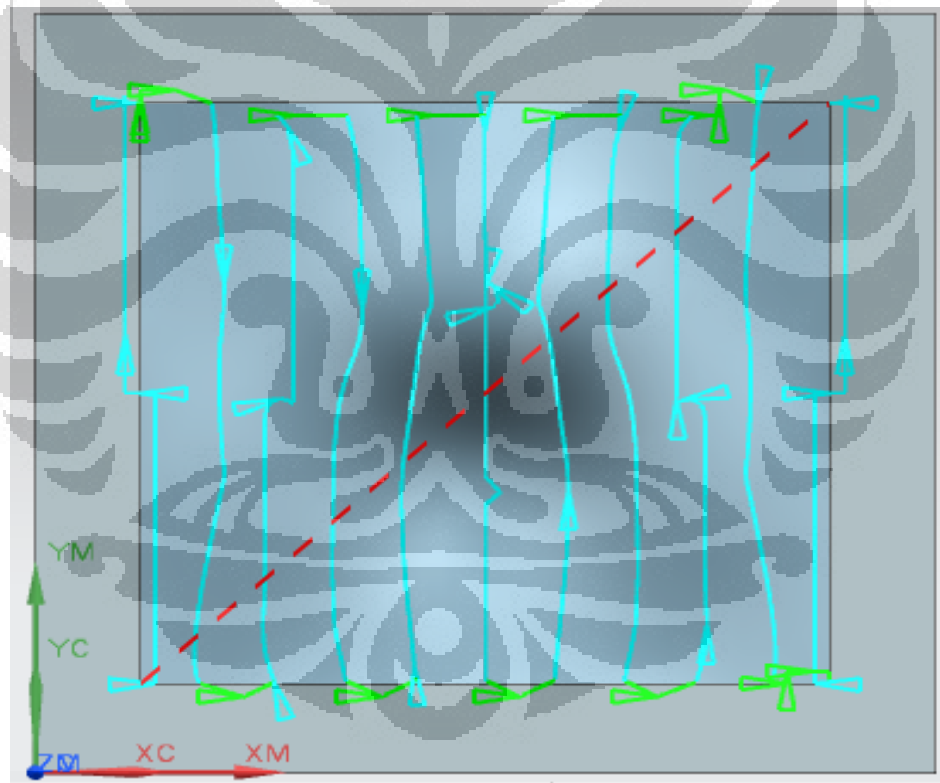
Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	Finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.075	0.0125
Ae	0.01	0.005

Tabel 3.30 *Cutting Parameter* operasi *finishing* untuk *workpiece steel model sculptured surface tipe male*

Finishing operation			
Contour area			
Tool ball-nose end mill 0.1 mm			
2 layer cutting			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge200% tool
Depth per cut	0.0125	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm
Extend at edges	no		
Extend at convex corner	no		
Roll tool over edges	no		

Tabel 3.31 Speed factor poerasi finishing untuk workpiece steel model sculptured surface tipe male

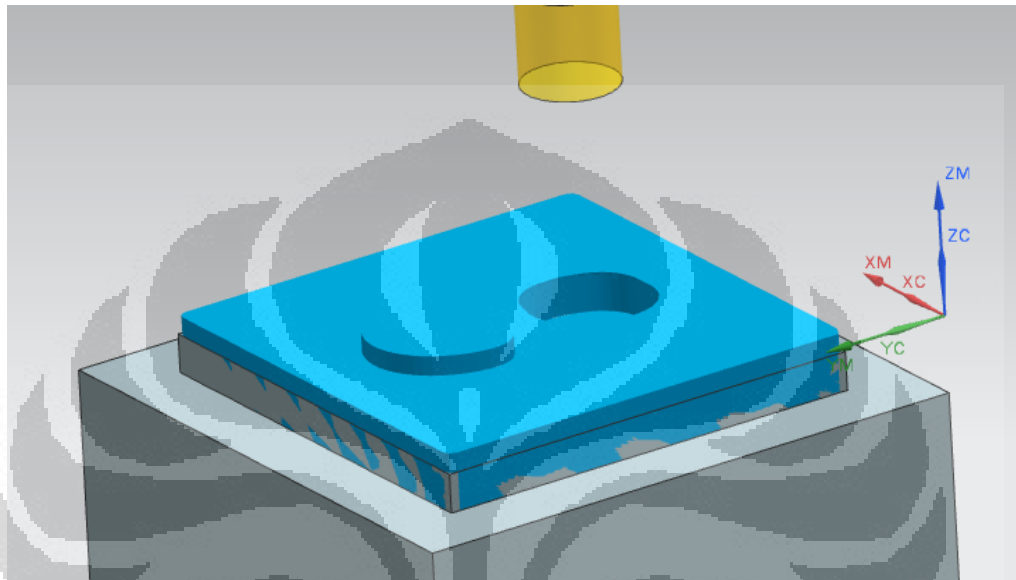
Speed factors (contour area 0.1mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.19 Toolpath finishing model sculptured surface tipe male

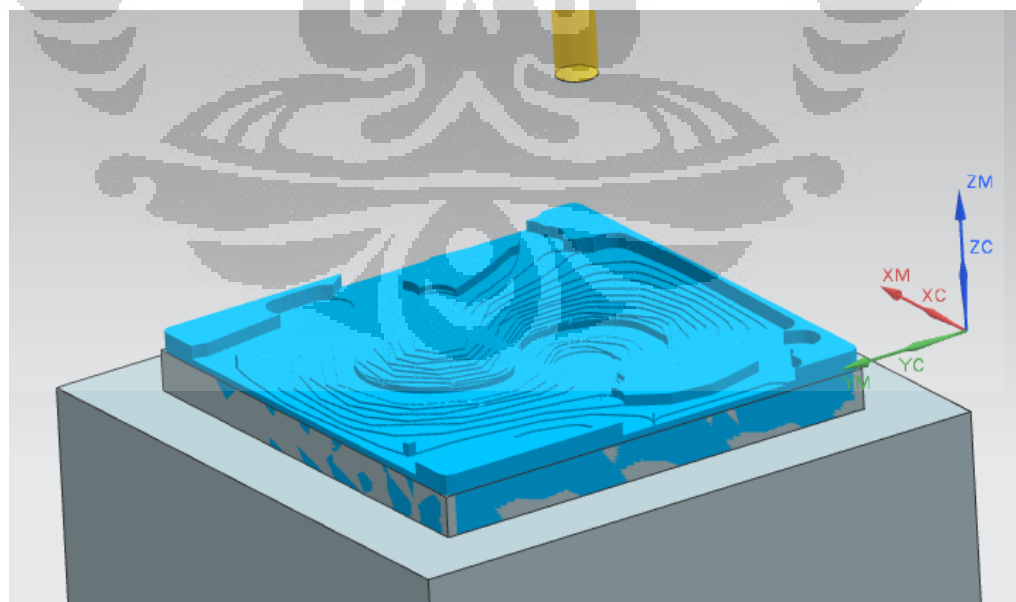
Gambar Hasil Simulasi Tiap Operasi pemesinan model *sculptured surface* tipe female.

I. Hasil akhir proses *roughing 1* (*face milling areal*)



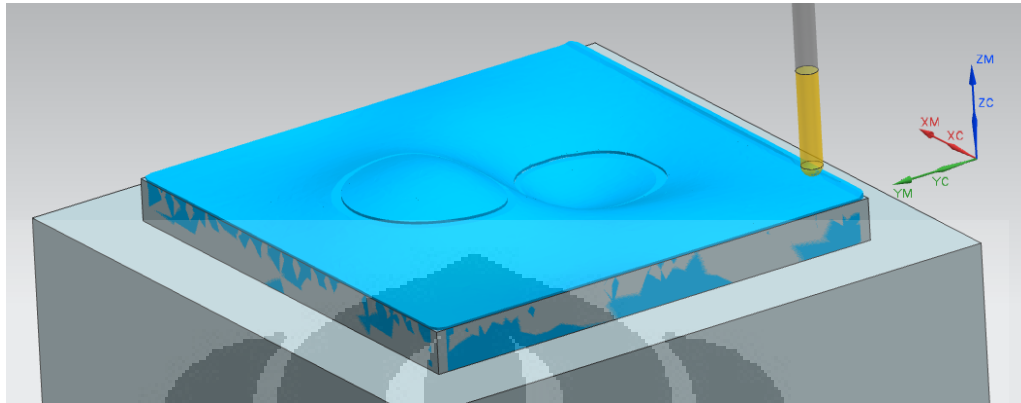
Gambar 3.20 Hasil operasi roughing model sculptured surface tipe male

II. Hasil akhir proses *roughing 2* (*Z – level Profile*)



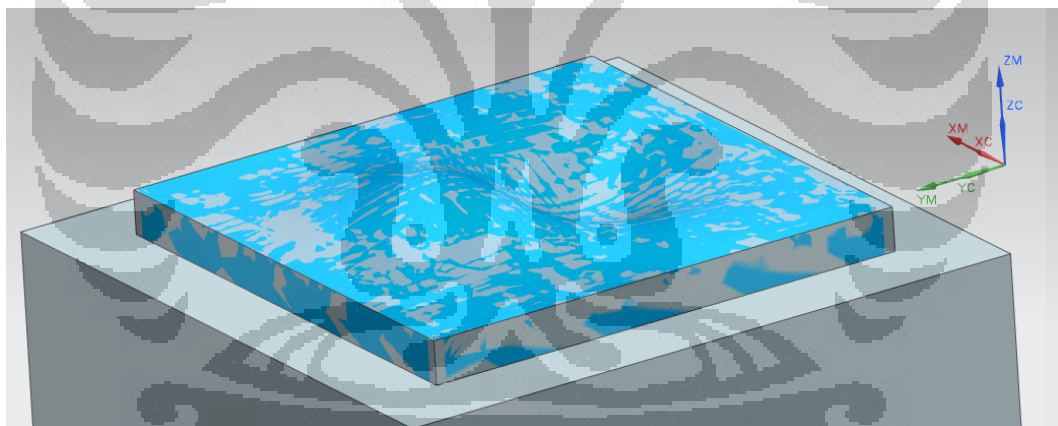
Gambar 3.21 Hasil operasi roughing 2 models sculptured surface tipe male

III. Proses *semi finishing* (*contour areal*)



Gambar 3.22 Hasil operasi *semi finishing* model *sculptured surface* tipe *male*

IV. Proses *finishing* (*contour areal*)



Gambar 3.23 Hasil operasi *finishing* model *sculptured surface* tipe *male*

3.2.2. Tahapan Desain Program Alternatif untuk Pemesinan Model *Sculptured Surface*

Pada sub bab ini, akan dijelaskan tiap proses pemesinan dimulai dari *facing*, *roughing*, *semi finishing*, dan *finishing*. Adapun tujuan dilakukan desain program pemesinan alternatif adalah pada proses pemesinan sub bab 3.2.1 tepatnya pada

proses *roughing* dan semi finishing, menggunakan *cutting tool* 0.5 mm dan 0.2 mm untuk proses *roughing*, sedangkan untuk *semi finishing* menggunakan *cutting tool* 0.2 mm. Namun, pada program pemesinan alternatif ini, menggunakan *cutting tool* 0.2 mm untuk proses *roughing* dan *semi finishing* menggunakan *cutting tool* 0.1 mm dan 0.2 mm sehingga bila hasil pemesinan dengan metode ini menghasilkan permukaan yang lebih halus dan tidak banyak *burr*, maka diharapkan selain meningkatkan kualitas pemesinan, juga mengurangi waktu *setting* alat dan menghemat tenaga.

Model yang digunakan adalah *sculptured surface* dengan tipe *male*.

Berikut ini, penjelasan lebih detil untuk setiap proses pemesinan.

1. Proses *facing*

Pada tahap ini, menggunakan *cutting tool* 2.0 mm dengan *depth per cut* 0.2 mm. Tujuan dari operasi ini, meratakan bagian atas permukaan benda kerja, sehingga, untuk step pemesinan selanjutnya, memiliki koordinat origin sumbu z yang sama untuk seluruh permukaan yang telah di - *facing*.

2. Proses *roughing 1*.

Proses ini melepaskan *material* dari atas *workpiece* sampai sampai kedalaman mencapai *part stock* operasi *roughing 2*. Adapun tujuan utama *roughing 1* melepaskan material sebanyak - banyaknya di areal pinggir *workpiece* hingga membentuk permukaan datar sedalam 0.5 mm mengelilingi pinggir *workpiece* serta memakan bagian tengah *workpiece* hingga membentuk permukaan kasar *sculptured surface*. Tipe program yang digunakan adalah *face milling areal*. Berikut ini, *cutting parameter* yang digunakan pada proses ini.

Tabel 3.32 Cuting parameter operasi roughing program alternative sculptured surface

Roughing operation			
Face Milling Area			
Tool flat end mill 2 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.1	Retract	same as engage
intol	0.035	Final retract	same as retract
outol	0.035	Clearance	1mm

Tabel 3.33 Komparasi nilai ap dan ae aktual – teoritis

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	2 mm	
Coating	Uncoated	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	1.2	0.1
Ae	0.1	0.1

Tabel 3.34 Speed factor operasi roughing program alternative sculptured surface

Speed factors (face milling area)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232.53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	679.7 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

3. Proses roughing 2.

Tipe program pemesinan yang digunakan adalah *rest milling*. tujuan utama dari operasi *roughing 2*, melepaskan material sebanyak mungkin pada areal tengah *workpiece* membentuk bukit dan kawah sebagai bagian dari

permukaan *sculptured surface*. Adapun selain program tersebut tersedia beberapa tipe program yang dapat digunakan untuk proses *roughing*. Namun, berdasarkan hasil simulasi *machining* dari *software* CAM, Siemens PLM NX 8.0 yang berulang kali, didapat bahwa tipe program *rest milling* mampu memakan luasan areal pelepasan material lebih luas mencakup daerah pinggir *workpiece*. Berikut ini, *cutting parameter* yang digunakan selama proses pemesinan.

Tabel 3.35 Cutting parameter operasi *roughing* 2 program alternative *sculptured surface*

Rest Milling			
Climb milling Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.03	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.05	Final retract	same as retract
outol	0.05	Clearance	1mm

Tabel 3.36 Komparasi nilai *ap* dan *ae* antara aktual - teoritis

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.01
Ae	0.01	0.01

Tabel 3.37 Speed factor operasi *roughing* program alternative *sculptured surface*

Speed factors (cavity mill badan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232.53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate

first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

4. Proses *semi finishing*

Tipe program pemesinan yang digunakan sama dengan perencanaan pemesinan *sculptured surface* sebelumnya, yaitu *contour areal*. *Cutting tool* yang digunakan dua macam 0.2 mm *flat end mill* dan 0.1 mm *ball nose end mill*. Berikut ini *cutting parameter* yang digunakan selama proses pemesinan berlangsung.

Tabel 3.38 *Cutting parameter operasi semi finishing program alternative sculptured surface*

Semi-finishing operation			
Contour area			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.02	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.05	Final retract	same as retract
outol	0.05	Clearance	1mm

Tabel 3.39 *Speed factor operasi semi finishing program alternative sculptured surface*

Speed factors (Contour area)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232.53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.40 Komparasi nilai a_p dan a_e antara aktual - teoritis

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.01
Ae	0.01	0.01

Tabel 3. 41 Cutting parameter operasi semi finishing program alternative sculptured surface

Semi-finishing operation			
Contour area			
Tool flat end mill 0.1 mm			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.02	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.05	Final retract	same as retract
outol	0.05	Clearance	1mm

Tabel 3. 42 Speed factor operasi semi finishing program alternative sculptured surface

Speed factors (Contour area)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232.53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.43 Komparasi nilai a_p dan a_e antara aktual - teoritis

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T	
Operation	Semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.06	0.01
Ae	0.005	0.005

5. Proses *finishing*

Proses *finishing* yang digunakan sama dengan desain pemesinan *sculptured surface* sebelumnya. Menggunakan tipe program *contour areal* dengan *cutting tool ball nose end mill* 0.1 mm. Proses pemesinan dilakukan sebanyak dua *layer*, dimana total ketebalan dua *layer* 0.025 mm. *layer* kedua berada tepat di atas *designed surface*. Besarnya *step over* 5 μ m dengan *depth per cut* sebesar 0.0125 mm.

Tabel 3.44 Cutting parameter operasi *finishing* program alternative *sculptured surface*

Finishing operation			
Contour area			
Tool ball-nose end mill 0.1 mm			
2 layer cutting			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge200% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.005	Final retract	same as retract
outol	0.005	Clearance	1mm

Tabel 3.45 Speed factor operasi finishing program alternative sculptured surface

Speed factors (Contour area)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232.53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.46 Komparasi nilai a_p dan a_e antara aktual - teoritis

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T	
Operation	Finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.06	0.0125
A_e	0.005	0.005

3.2.3. Tahapan Desain Program Pemesinan CAM pada Logo Android

Proses pemesinan logo Android menggunakan material *workpiece steel*, dimana terdiri dari model tipe *female* dan *male*. Adapun tujuan dari proses manufaktur ini adalah mengetahui kemampuan *machine tool* untuk membuat model logo yang sudah dikenal. Secara garis besar, proses manufaktur logo android dibagi empat step utama yang terdiri dari proses *facing*, *roughing*, *semi finishing*, dan *finishing*. Pada bab ini akan dijelaskan lebih detil pemilihan *cutting parameter* dan *tool path* proses pemesinan untuk tiap model yang di *machining*.

3.2.2.3. Desain Program CAM pada Logo Android tipe *female*.

1. *Facing*

Proses ini sama dengan operasi – operasi pada pemesinan model sebelumnya. Menggunakan *cutting tool* 2.0 mm *flat end mill* dengan *depth*

per cut sebesar 0.2 mm dan *step over* sebesar 50% dari diameter *cutting tool*.

2. *Roughing*

Operasi *roughing* yang dijalankan meliputi proses *roughing* pada areal kepala, badan, dan tangan. Adapun alasan mengapa pada proses *roughing* ini dibagi per step, dikarenakan areal yang dimakan memiliki lebar yang berbeda. Seperti areal badan yang berbentuk cekungan, masih dapat dimakan dengan *cutting tool* 0.5 mm, sedangkan untuk areal kepala dan tangan harus menggunakan *cutting tool* 0.1 mm. Hal ini dikarenakan pada areal kepala terdapat celah antar dua gunung membentuk mata *android* yang cukup sempit dan hanya mampu dilewati *cutting tool* 0.1 mm dan harus *ball nose end mill* guna melewati pinggir areal kepala yang berbentuk kurva. Untuk areal tangan juga dimakan dengan *cutting tool ball nose end mill* 0.1 mm dikarenakan lebar celah hanya mampu dilewati *cutting tool* 0.1 mm, sedangkan untuk permukaan dinding yang ber kurva dapat dimakan dengan *cutting tool ball nose end mill*.

Tabel 3.47 *cutting parameter operasi roughing areal badan model android tipe female*

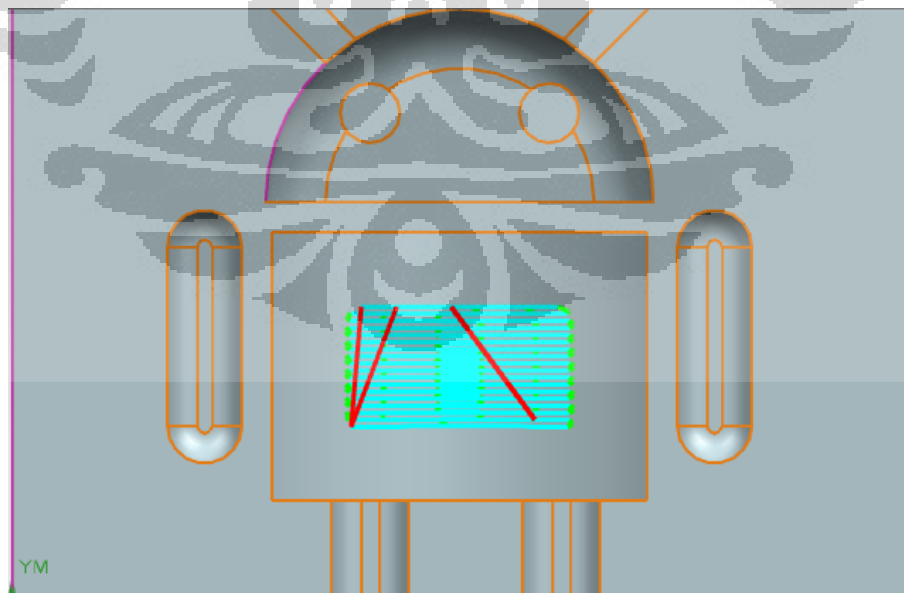
Roughing operation (Badan)			
Cavity mill			
Tool flat end mill 0.5 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.025	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3. 48 Speed factor operasi roughing areal badan model android tipe female

Speed factors (cavity mill badan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	169.92 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3. 49 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk wokpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.5 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.1
Ae	0.025	0.025



Gambar 3.24 Toolpath roughing areal badan model android tipe female

Tabel 3.50 Cutting parameter operasi roughing areal kepala model android tipe female

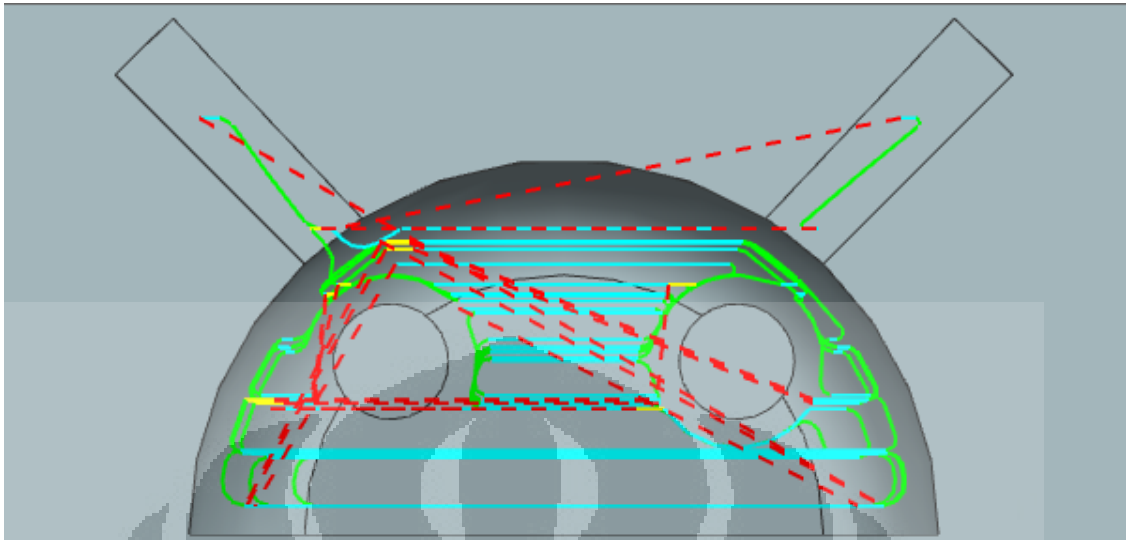
Roughing operation (Kepala)			
Cavity mill			
ball nose end mill 0.1 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.02	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.04	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.51 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.04
Ae	0.005	0.005

Tabel 3.52 Speed factor untuk operasi roughing kepala model android tipe female

Speed factors (Cavity mill kepala)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.25 Toolpath roughing areal kepala model android tipe female

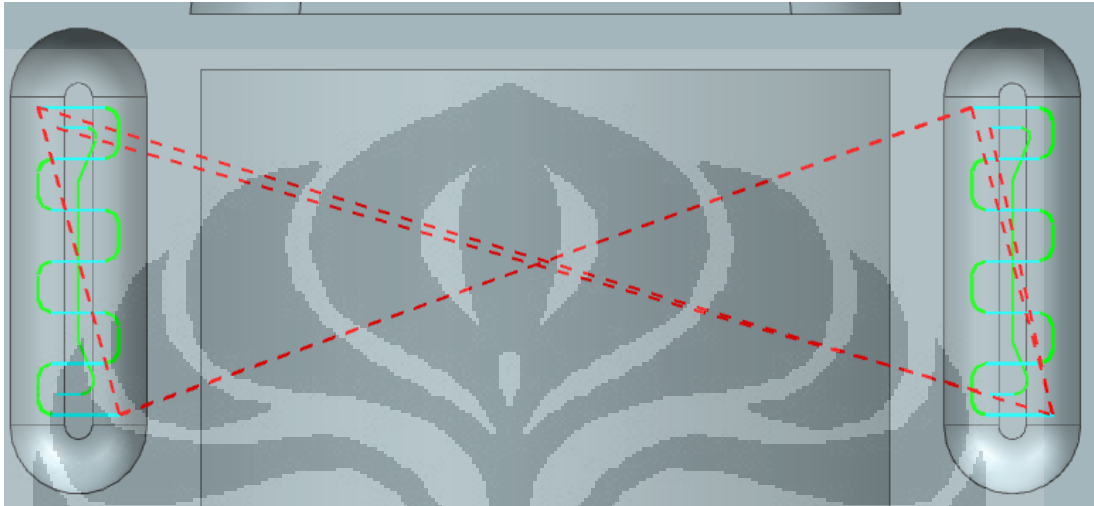
Tabel 3.53 Cutting parameter roughing areal tangan model android tipe female

Roughing operation (Tangan)			
Rest milling			
ball nose end mill 0.1 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.004	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.54 speed factor untuk operasi roughing tangan model android tipe female

Speed factors (rest mill tangan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate

step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.26 Toolpath roughing areal tangan model android tipe female

Tabel 3.55 Komparasi a_p dan a_e antara actual – teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.12	0.004
A_e	0.005	0.005

3. *Semi finishing*

Untuk operasi *semi finishing*, terdiri dari dua step. Yaitu step *semi finishing* pada areal kepala dan badan. Berikut ini spesifikasi detail untuk *cutting parameter* dan pola *toolpath* yang digunakan untuk operasi *semi finishing*.

Tabel 3.56 Cutting parameter untuk semi finishing badan model android tipe female

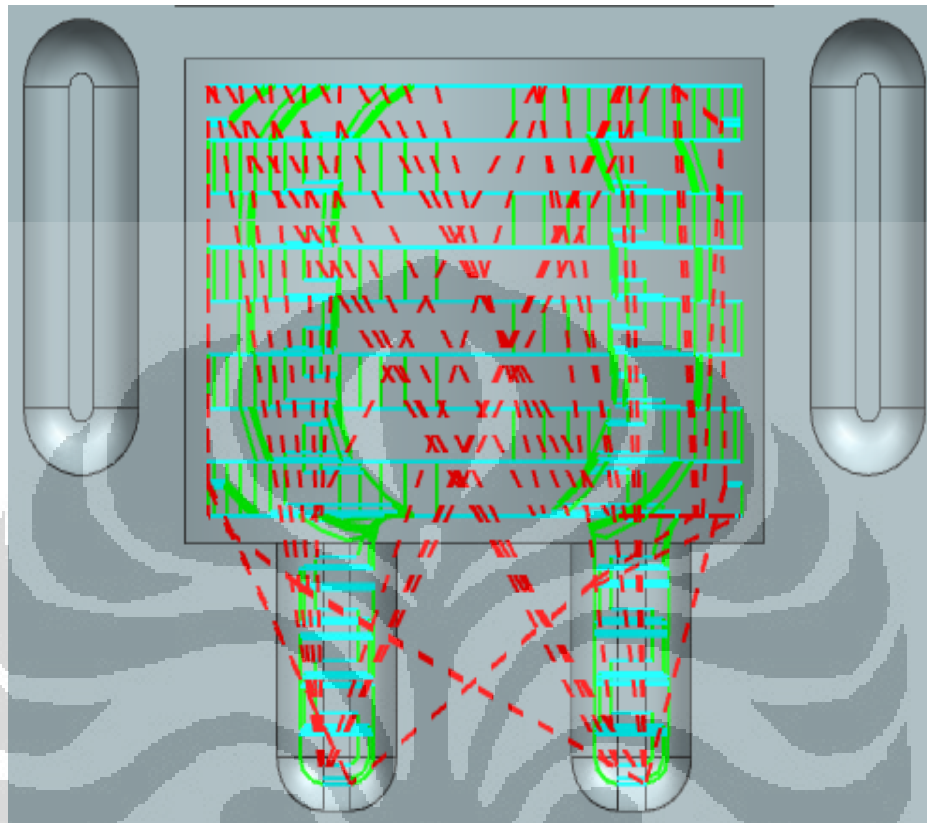
Semi-finishing operation (Badan)			
Rest Milling			
ball nose end mill 0.1 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.02	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.57 Speed factor untuk operasi semi finishing badan model android tipe female

Speed factors (rest milling badan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.58 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.02
Ae	0.01	0.005



Gambar 3.27 Toolpath semi finishing areal badan model android tipe female

Tabel 3.59 Cutting parameter semi finishing kepala model android tipe female

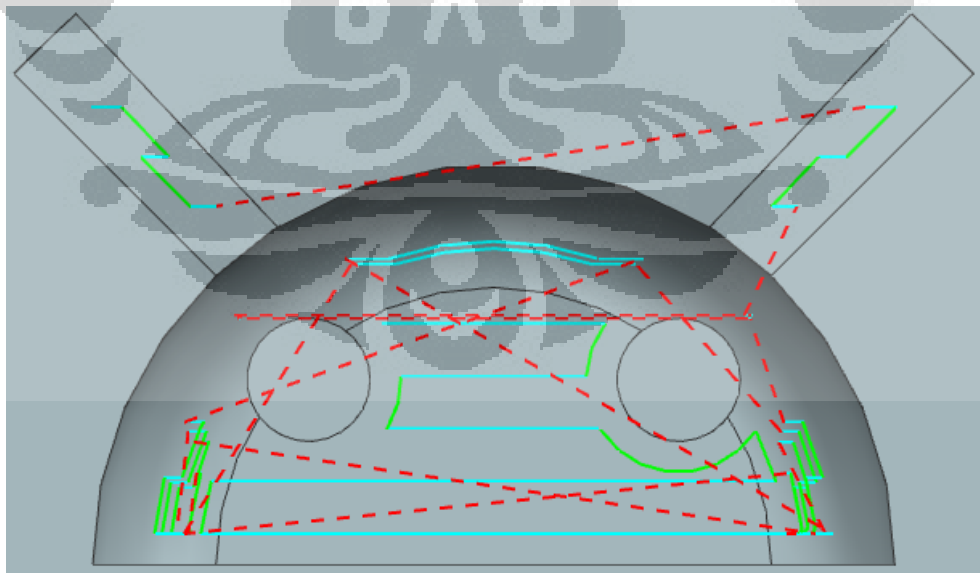
Semi-finishing operation (Kepala)			
Rest Milling			
ball nose end mill 0.1 mm			
Area milling drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.05	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.60 Speed factor untuk operasi semi finishing kepala

Speed factors (rest milling badan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.61 Komparasi ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.01
Ae	0.01	0.05



Gambar 3.28 Toolpath semi finishing areal kelapa model android tipe female

4. Finishing

Operasi *finishing* meliputi seluruh areal model dari kepala, badan, dan tangan. Menggunakan *cutting tool* 0.1 mm *ball nose end mill* dan satu layer pelepasan material. Berikut ini penjelasan lebih detail untuk *cutting parameter* dan *toolpath finishing* yang digunakan.

Tabel 3.62 *Cutting parameter operasi finishing model android tipe female*

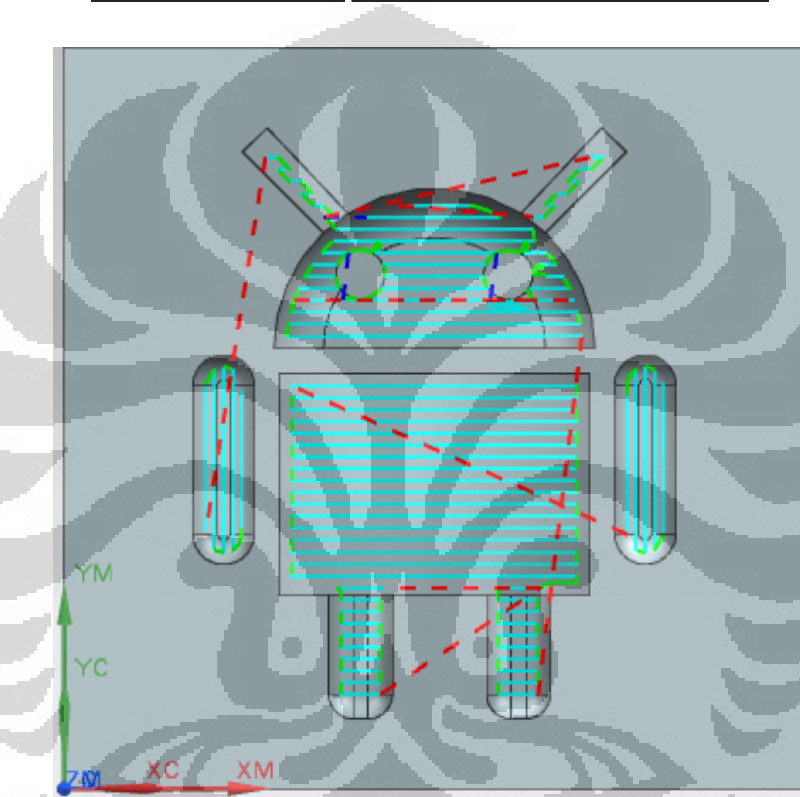
Finishing operation			
Contour Area			
ball nose end mill 0.1 mm			
Area milling drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm

Tabel 3.63 *Speed factor untuk operasi semi finishing kepala model android tipe female*

Speed factors (rest milling badan)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	33.98 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.64 Komparasi a_p dan a_e antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

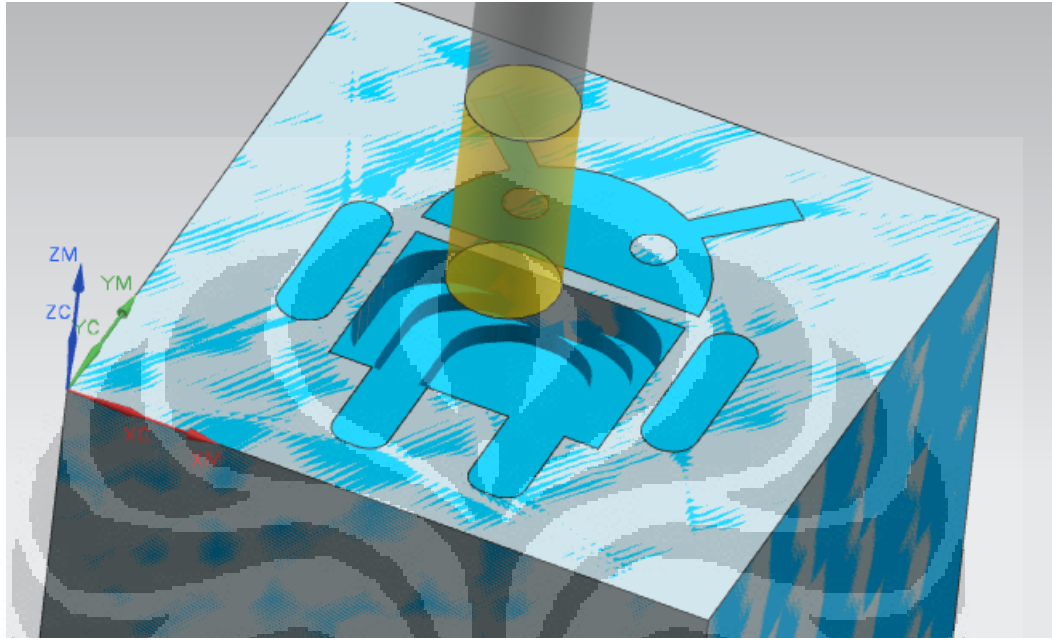
Cutting tool type	Ball end mill	
Diameter	0.1 mm	
Coating	MEGA - T tipe PVD	
Operation	semi finishing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.12	0.01
A_e	0.01	0.005



Gambar 3.29 Toolpath finishing model android tipe female

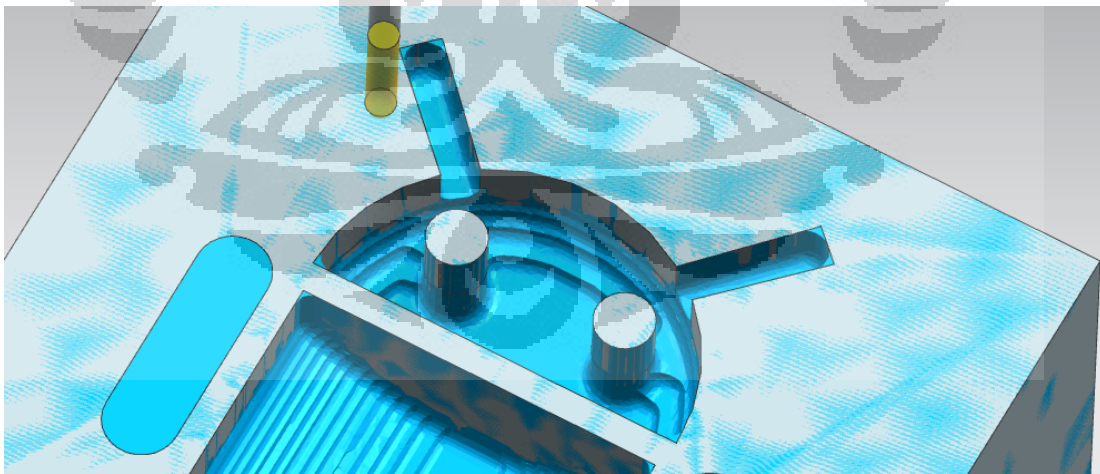
Gambar Hasil Simulasi Tiap Operasi pemesinan model *Android* tipe female.

1. Operasi *roughing* areal badan (*program cavity mill*)



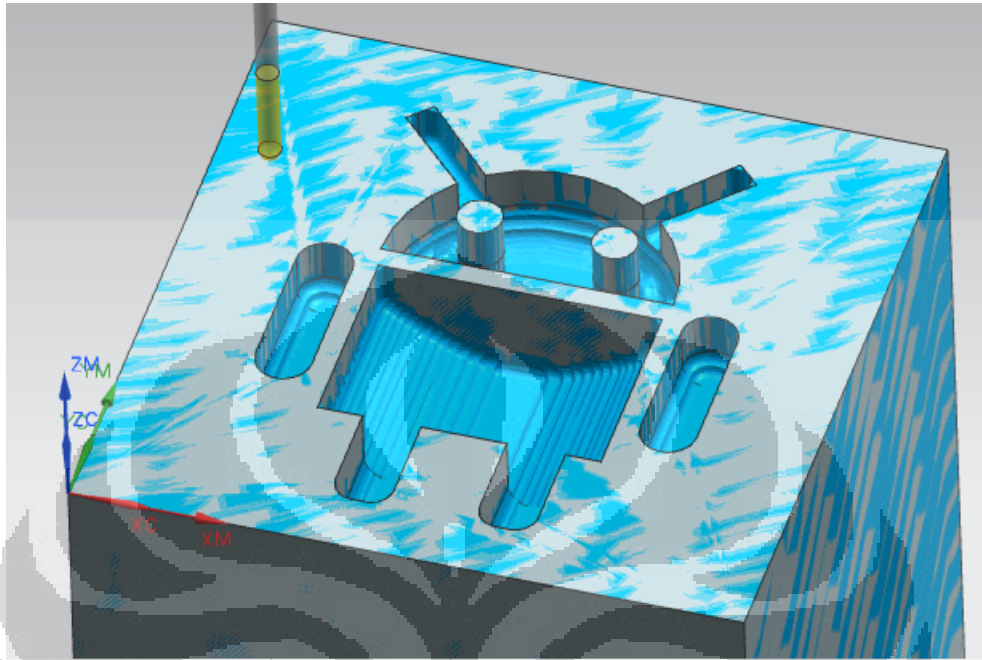
Gambar 3.30 Roughing areal badan model android tipe female

2. Operasi *roughing* areal kepala (*program cavity mill*)



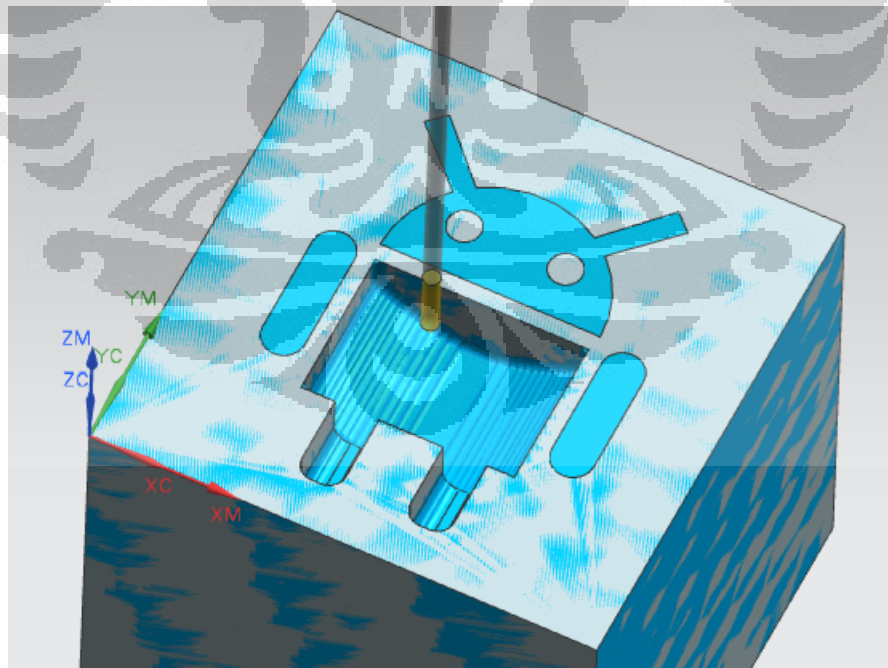
Gambar 3.31 Hasil roughing areal kepala model android tipe female

3. Operasi *roughing* areal tangan (program *cavity mill*).



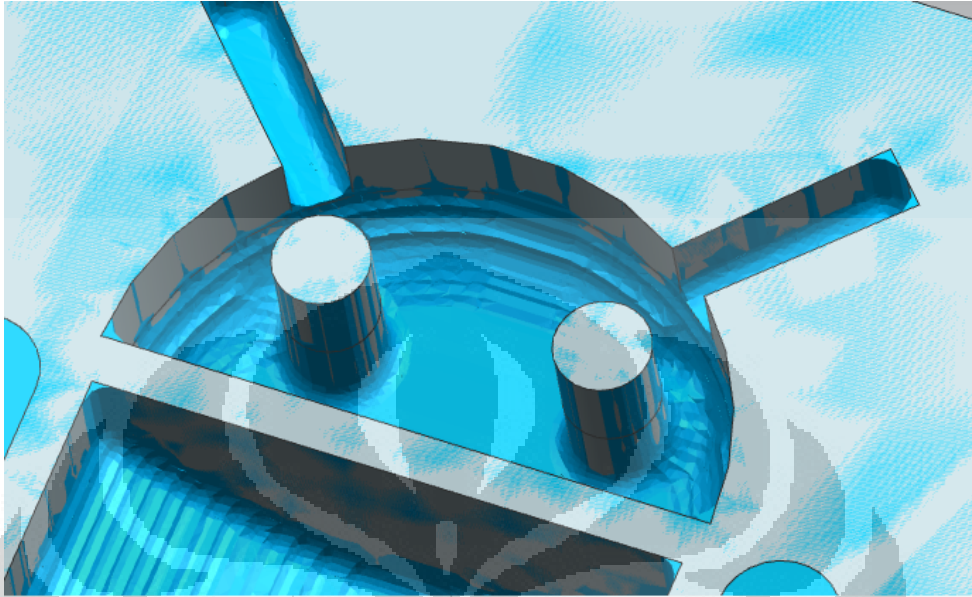
Gambar 3.32 Hasil *roughing* areal tangan model android tipe female

4. Operasi *semi finishing* areal badan (program *rest milling*).



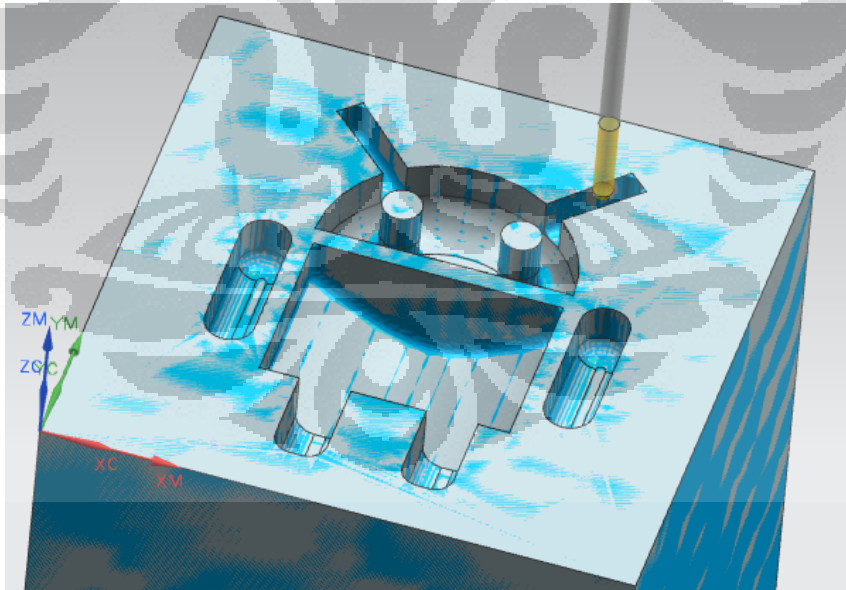
Gambar 3.33 Hasil *semi finishing* areal badan model android tipe female

5. Operasi *semi finishing* areal kepala (program *rest milling*).



Gambar 3.34 Hasil semi finishing areal kepala model android tipe female

6. Operasi *finishing* seluruh areal model (program *contour area*).



Gambar 3.35 Hasil finishing areal kepala model android tipe female

3.2.2.4. Desain Program CAM pada Logo Android tipe *male*

Pada proses pemesinan model *android* tipe *male*, terdiri dari tahap *roughing* daerah *offset* luar model, *roughing profiling kontur model*, *Semi finishing* pada sekeliling areal atas model, dan terakhir finishing untuk *deburring* areal pinggir *profile*.

Berikut ini akan dijelaskan lebih detail *cutting parameter* dan *toolpath* yang digunakan selama proses pemesinan *android* tipe *male*.

1. *Roughing* areal luar profil

Tabel 3.65 *Cutting parameter proses roughing model android tipe male*

Roughing operation			
Face Milling Areal			
Tool flat end mill 0.5 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves (mm)		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open areal	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed areal	same as open areal
Width of cut	0.025	Retract	same as engage
intol	0.02	Final retract	same as retract
outol	0.02	Clearance	1mm
Finish passes added	5% tool dia stepover		

Tabel 3.66 Speed factor untuk operasi roughing model android tipe male

Speed factors (face area mill)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	169.92 m/men
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Tabel 3.67 Komparasi a_p dan a_e antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.5 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.3	0.1
A_e	0.025	0.025



Gambar 3.36 Toolpath operasi roughing areal luar model android tipe male

2. *Semifinishing* areal atas profil.

Tabel 3.68 Cutting parameter proses semi finishing areal atas profil model android tipe male

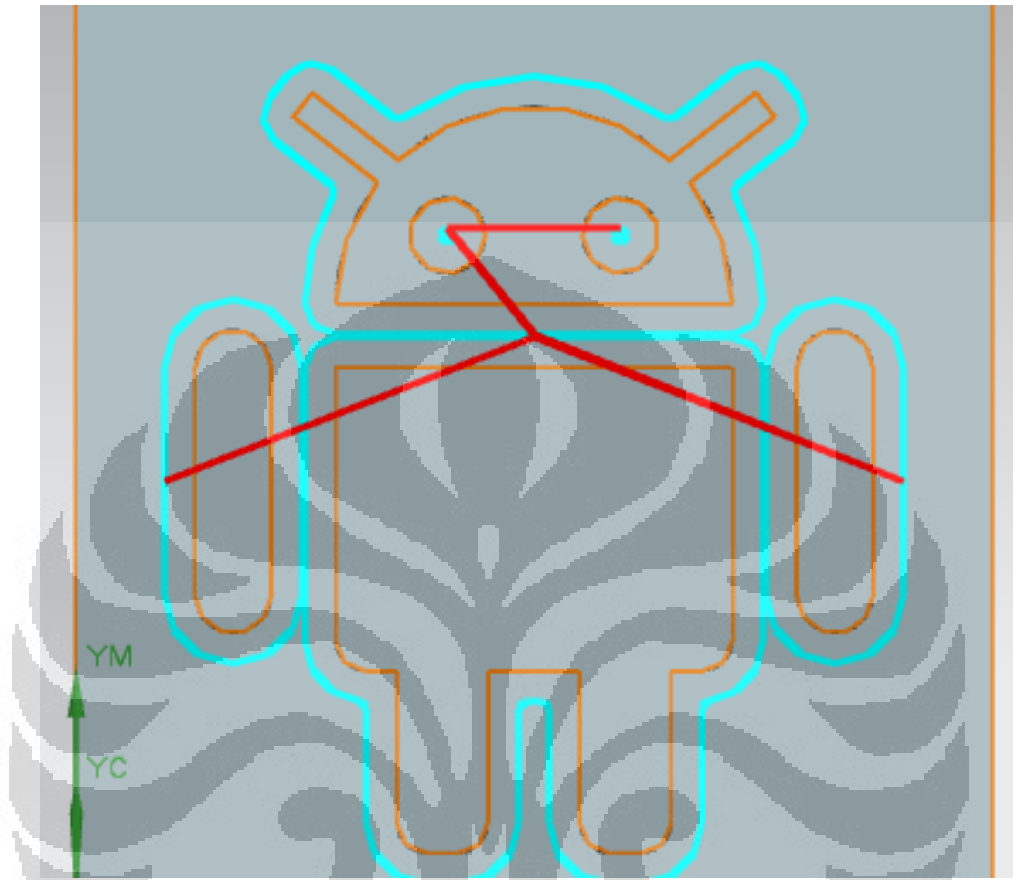
Face Milling Area 2 (profiling)			
Climb milling Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves (mm)		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.69 Komparasi ap dan ae antara actual – teoritis untuk material steel.

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.01
Ae	0.01	0.01

Tabel 3.70 Speed factor operasi semi finishing areal atas profil model android tipe male

Speed factors (face area mill 2)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.37 Toolpath semi finishing areal atas profil model android tipe male

3. Finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil

Tabel 3.71 Cutting parameter proses finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male

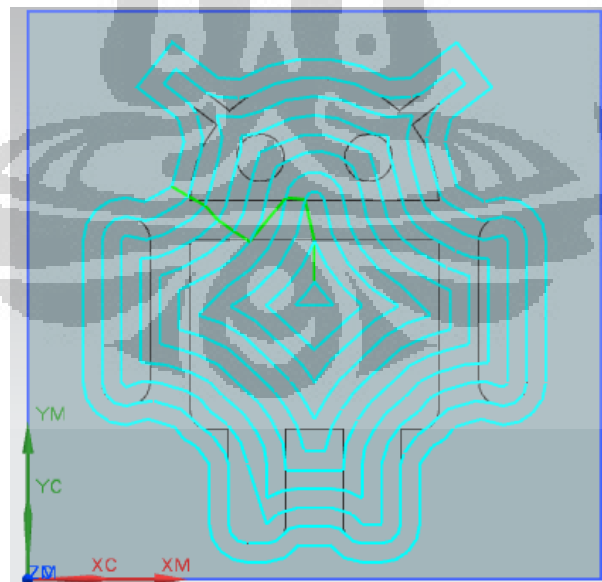
Finishing operation			
Face Milling Area 3 (face cleaning)			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves (mm)		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.1	Final retract	same as retract
outol	0.1	Clearance	1mm

Tabel 3.72 Komparasi a_p dan a_e antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
A_p	0.12	0.1
A_e	0.01	0.01

Tabel 3.73 Speed factor untuk operasi finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male

Speed factors (contour area 0.2 mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.38 Toolpath finishing seluruh permukaan sisi dalam dan luar profil model android tipe male

4. Finishing

Tabel 3.74 Cutting parameter proses finishing deburring model android tipe male

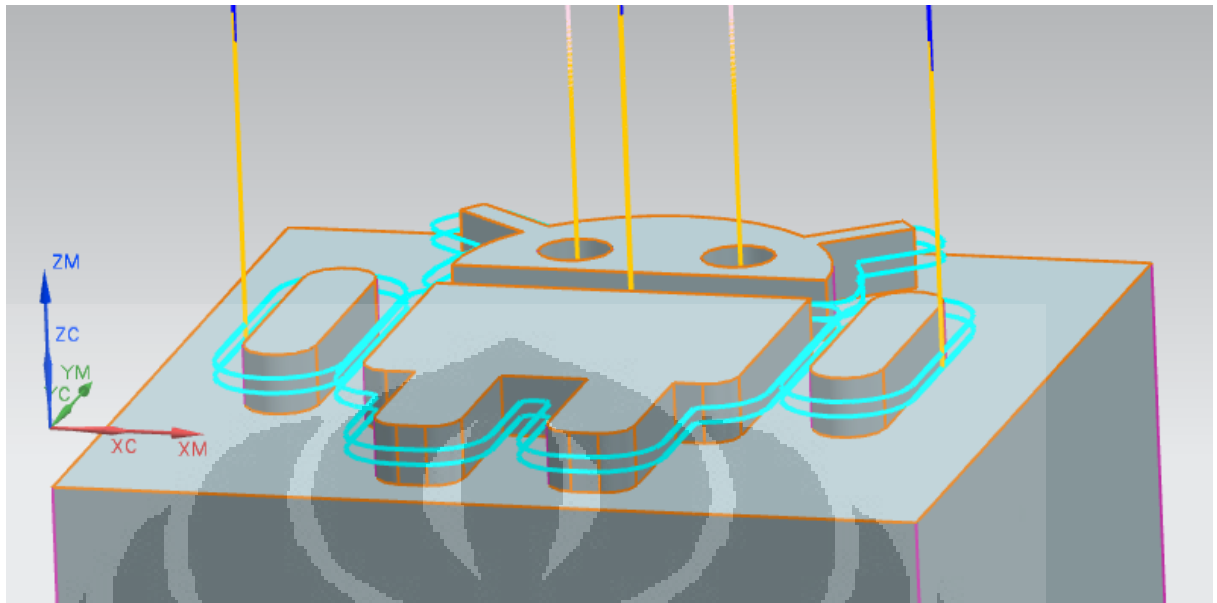
Finishing operation			
Face Milling Area 3 (deburring)			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves (mm)		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge200% tool
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm

Tabel 3.75 Komparasi nilai ap dan ae antara actual dan teoritis untuk workpiece steel

Cutting tool type	Flat end mill	
Diameter	0.2 mm	
Coating	nACro	
Operation	Roughing	
	Catalog (mm)	Actual (mm)
Ap	0.12	0.1
Ae	0.01	0.01

Tabel 3.76 Speed factor untuk operasi finishing deburring model android tipe male

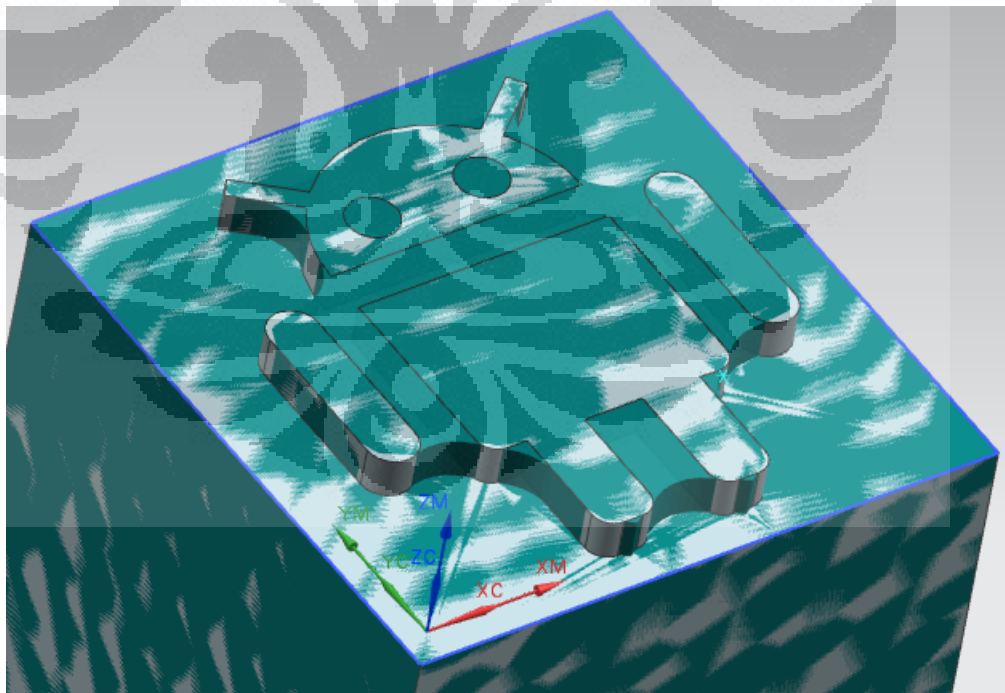
Speed factors (contour area 0.2 mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	108232,53 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	67.97 m/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.39 Toolpath finishing deburring model android tipe male

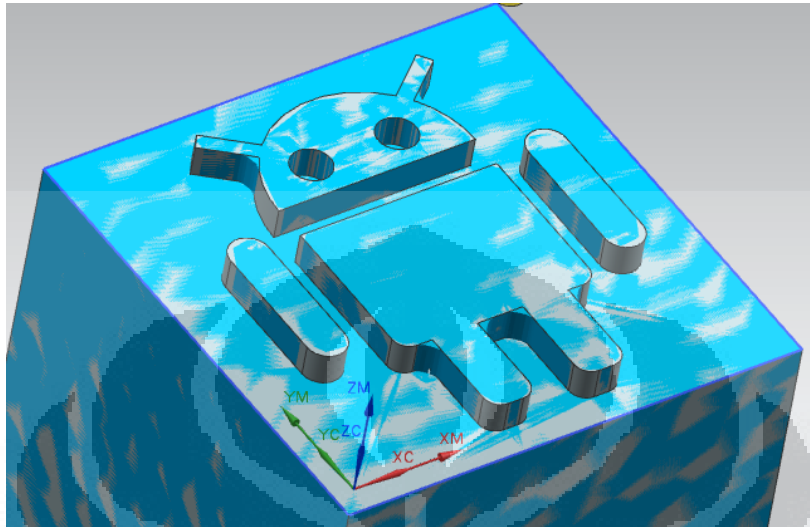
Gambar Hasil Simulasi Tiap Operasi pemesinan model *Android* tipe *male*

1. Hasil akhir operasi *roughing* (program *face milling area*)



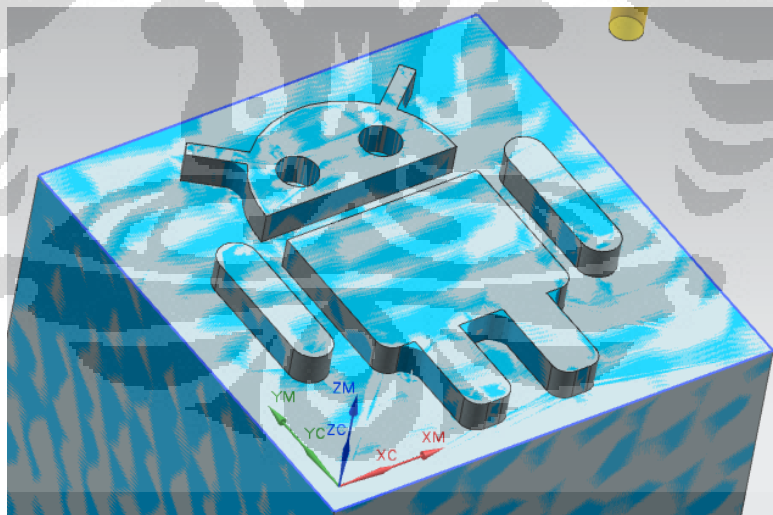
Gambar 3.40 Hasil akhir operasi roughing model android tipe male

2. Hasil akhir operasi *semi finishing* areal atas profil
(program *face milling area*)



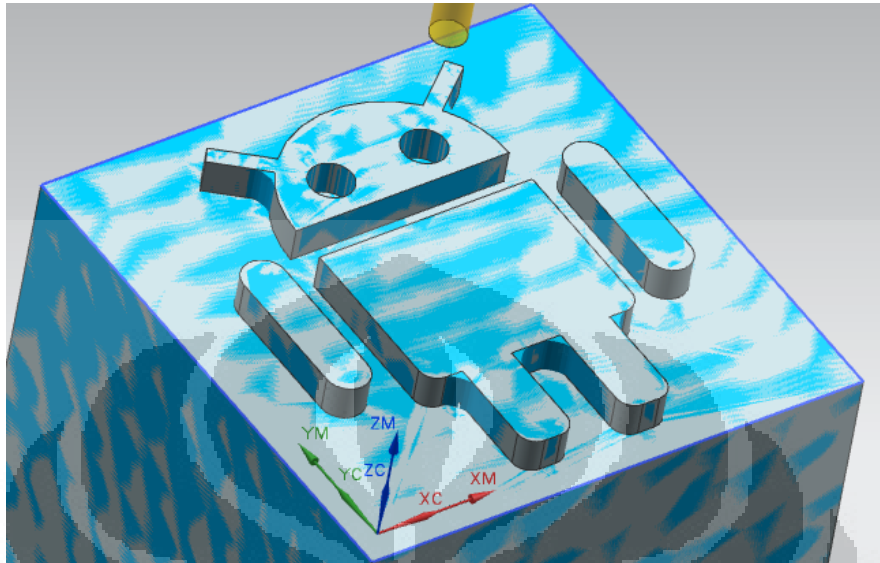
Gambar 3.41 Hasil akhir operasi *semi finishing* areal atas profil model android tipe male

3. Hasil akhir operasi *semi finishing* areal luar dan dalam profil
(program *face milling area*)



Gambar 3.42 Hasil akhir *finishing* areal luar dan dalam profil model android tipe male

4. Hasil akhir operasi *finshng deburring* (program *face milling area*)



Gambar 3.43 Hasil akhir operasi *finishing deburring* model android tipe male

3.4. NC Generation

Proses ini merupakan tahapan *data exchange* dari format .txt menjadi .prg dengan *post processor software*. Dimana, *software* ini dibuat menggunakan bahasa pemrograman, *visual studio*. *Post – processor* yang digunakan pada penelitian kali ini terdiri dari dua *software* yang terpisah.

1. *Software* pertama adalah men – generalisasikan data ekstensi .prg kosong.
2. *Software* kedua adalah mengubah data CL –file yang berbasis koordinat *software* Siemens PLM NX menjadi NC – file yang berisi data posisi *cutting tool* berdasarkan koordinat *machine tool*.

Tahap penggunaan *post – processor* ini dimulai pada *software* pertama. Kemudian, setelah menempatkan *cutting tool* pada titik *origin* (0,0,0) di benda kerja, koordinat tersebut langsung dimasukkan kedalam *software* kedua, juga memasukkan *file addres* data .prg dan .txt. ke *software* tersebut.

Hasil *output* – an berupa serangkaian data NC – file dari koordinat *cutting tool*.

```

TOOL PATH/CAVITY_MILL,TOOL_MILL_1
TLDDATA/MILL,0.5000,0.0000,5.0000,0.0000,0.0000
MSYS/-1.5000,-1.5000,-0.1000,1.0000000,0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0000000
$$ centerline data
PAINT/PATH
PAINT/SPEED,10
PAINT/COLOR,186
RAPID
GOTO/1.1704,1.4335,0.5000,0.0000000,0.0000000,1.0000000
PAINT/COLOR,6
FEDRAT/MMPM,250.0000
GOTO/1.1704,1.4335,-0.0950
PAINT/COLOR,31
GOTO/1.8296,1.4335,-0.0950
PAINT/COLOR,36
CIRCLE/1.8296,1.4210,-0.0950,0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0125,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.8297,1.4335,-0.0950
CIRCLE/1.8293,1.3835,-0.0950,0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0500,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.8653,1.4182,-0.0950
CIRCLE/1.8617,1.4148,-0.0950,0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0050,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.8617,1.4098,-0.0950
PAINT/COLOR,31
GOTO/1.1358,1.4098,-0.0950
PAINT/COLOR,36
CIRCLE/1.1358,1.3973,-0.0950,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,0.0125,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.1242,1.4018,-0.0950
CIRCLE/1.1707,1.3835,-0.0950,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,0.0500,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.1232,1.3992,-0.0950
CIRCLE/1.1327,1.3960,-0.0950,0.0000000,0.0000000,-1.0000000,0.0100,0.0200,0.5000,0.5000,0.0000
GOTO/1.1327,1.3860,-0.0950
PAINT/COLOR,31

```

Gambar 3.44 Data CL – file

```

1,AXI1:SELSP 4:F4 1000
2,AXI2:SELSP 4:F4 1000
3,AXI3:SELSP 4:F4 1000
4,GOLA X-3.4165 Y2.5704 Z2.81
5,GOLA X-3.4165 Y2.5704 Z3.405
6,GOLA X-3.4165 Y3.2296 Z3.405
7,GOLA X-3.4165 Y3.2297 Z3.405
8,GOLA X-3.4318 Y3.2653 Z3.405
9,GOLA X-3.4402 Y3.2617 Z3.405
10,GOLA X-3.4402 Y2.5358 Z3.405
11,GOLA X-3.4482 Y2.5242 Z3.405
12,GOLA X-3.4508 Y2.5232 Z3.405
13,GOLA X-3.464 Y2.5327 Z3.405
14,GOLA X-3.464 Y3.2675 Z3.405
15,GOLA X-3.4758 Y3.2793 Z3.405
16,GOLA X-3.477 Y3.2793 Z3.405
17,GOLA X-3.4877 Y3.2686 Z3.405
18,GOLA X-3.4877 Y2.5314 Z3.405
19,GOLA X-3.4984 Y2.5207 Z3.405
20,GOLA X-3.4989 Y2.5207 Z3.405
21,GOLA X-3.5114 Y2.5332 Z3.405
22,GOLA X-3.5114 Y3.2686 Z3.405
23,GOLA X-3.5221 Y3.2793 Z3.405
24,GOLA X-3.5227 Y3.2793 Z3.405
25,GOLA X-3.5352 Y3.2668 Z3.405
26,GOLA X-3.5352 Y2.5314 Z3.405

```

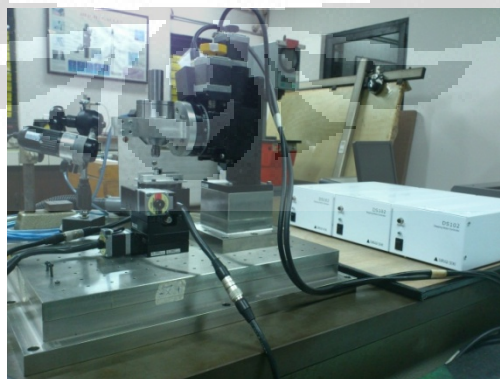
Gambar 3.45 Data NC – file

3.5. Spesifikasi *Machine Tool* Beserta Komponen yang Terkait

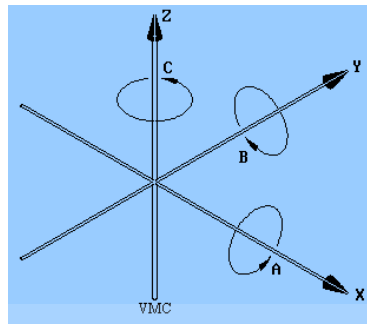
Setelah melalui tahap perancangan program pemesinan dan sebelum memulai proses *machining*, maka dipastikan semua unit *milling machine tool* dalam kondisi normal, seperti posisi awal *spindle* yang sudah diposisikan origin, tekanan kompresor yang direkomendasikan, dan yang terpenting adalah lebih mengenal karakteristik *machine tool* akan dijelaskan pada bab ini. Penjelasan yang diperlukan sebagai acuan dan standar pengoperasian *machine tool* mencakup spesifikasi *machine tool* yang digunakan, *fixture_* atau *clamping_* yang digunakan untuk menjepit benda kerja, karakteristi putaran *spindle*, dan terakhir adalah proses jalannya pemesinan model “*micro mold*”.

3.4.1. Spesifikasi *Machine Tool*

Pada penelitian ini, menggunakan *machine tool milling 5 axis* dengan pergerakan motor terhadap sumbu X, Y, dan Z. untuk sumbu *rotary* yang digunakan yaitu sumbu A dan C. Pada *table* bergerak sumbu X, Y, dan C. sedangkan pada *spindle* bergerak sumbu A. sumbu Z bergerak secara vertical. Aktuator *spindle* berupa *air bearing* yang diputar oleh udara berkompresi tinggi dan mampu memutar *air bearing* dengan kecepatan tinggi. Adapun mengapa *machine tool* ini di desain untuk menggerakan *spindle* berputaran tinggi, karena untuk proses *micro milling* dimana *feed rate* dan *cutting speed* yang rendah harus diimbangi dengan RPM tinggi.

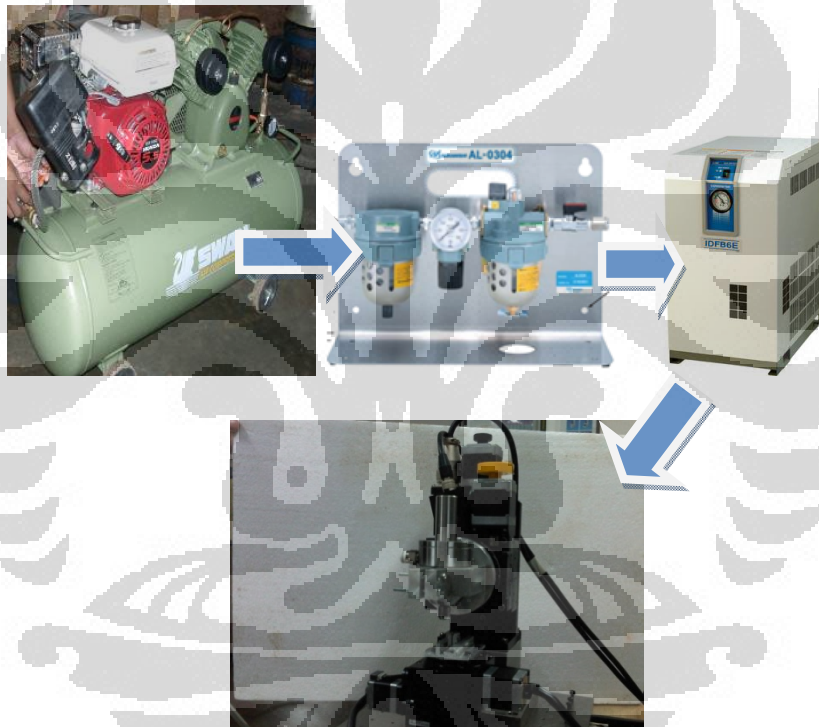


Gambar 3.46 Mesin Micro – Milling 5 axis.



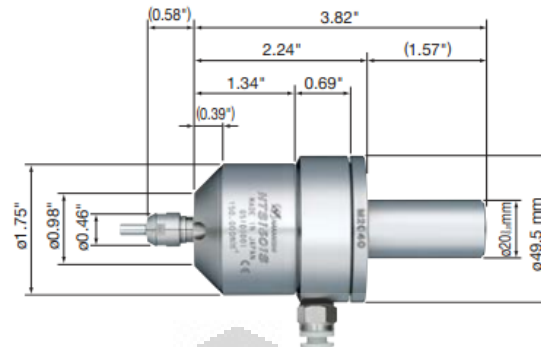
Gambar 3.47 Sistem koordinat 5 axis [8]

Berikut ini skematik aliran fluida udara yang digunakan untuk memutar spindel.

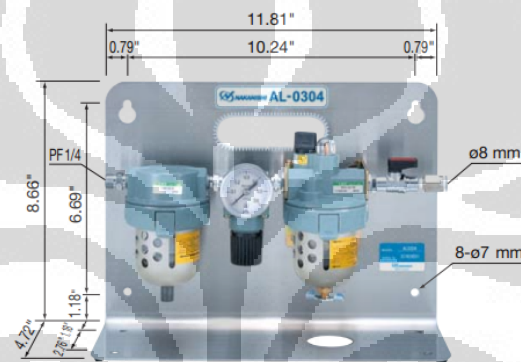


Gambar 3.48 Skematik machine tool

Berikut penjelasan skematik fluida sebagai sumber penggerak spindel. Dimulai dari udara atmosfer yang dinaikkan tekanannya oleh kompresor dan dialirkan ke perangkat *air dryer* untuk memisahkan kandungan air pada udara yang bertekanan. Setelah itu, langsung di alirkan ke *air filter* dan *pressure regulator* tipe AIR LINE AL – 0304. Setelah udara dikontrol tekanan untuk masuk ke *spindle* dan di *filter*, akan bercampur dengan minyak pelumas di *mixing chamber*.



Gambar 3.49 Air spindle [16]



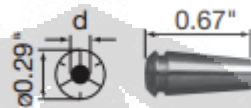
Gambar 3.50 AIR LINE AL – 0304 [16]

Tujuannya antara lain agar perputaran *spindle* lebih halus dan tidak terlalu terbebani. Udara bercampur pelumas mengalir ke ruang *air bearing* dan memutar *spindle*. Tipe *air spindle* yang digunakan HTS1501S – M2040 dengan kecepatan *spindle* maksimum mencapai 150,000 RPM [Artco NSK HTS *Air spindle* halaman 6]. Besarnya putaran *spindle* dapat diatur melalui kran / *valve* di *pressure regulator*. Saat proses pemesinan berlangsung, tekanan pada *regulator* di – *maintain* ± 0.4 MPa. Kurang dari nilai tersebut, ada kemungkinan putaran *spindle* akan tersendat – sendat. Selain itu yang perlu diperhatikan *level* minyak pelumas di *mixing chamber* selalu pada posisi tengah atau lebih.

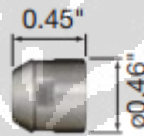
Komponen tambahan pada bagian *spinde* adalah *collet*. Fungsinya sebagai penjepit *cutting tool* yang dimasukkan kedalam *collet* yang berbentuk selongsong memiliki

guratan di setiap sisi, sehingga memiliki fleksibilitas untuk menjepit *cutting tool*. Untuk mengatur pengencangan *collet* dengan memutar mur *collet* pada ujung *spindle*.

Untuk spesifikasi *collet* tipe CHA yang digunakan ada dua jenis. Untuk diameter *tool shank* 0.3 mm dan 0.4 mm. sistem pengunci *collet* menggunakan mur tipe *collet nut* CHN – A yang dipasang di ujung *spindle*



Gambar 3.48 Dimensi collet [16]

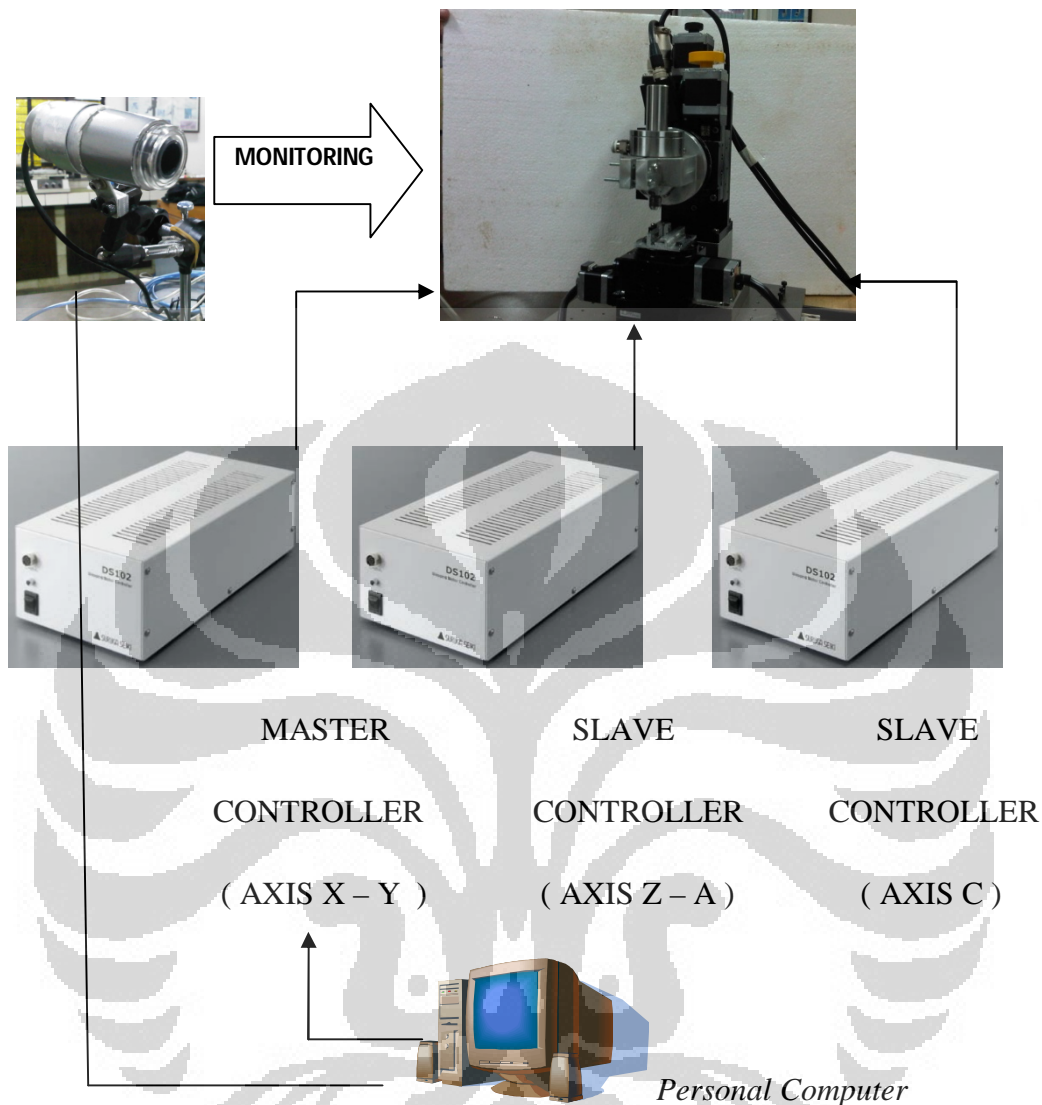


Gambar 3.49 Dimensi collet nut [16]

Tabel 3.77 Spesifikasi diameter collet [16]

CAT. No.	Model	Inside Diameter d
RA11813	CHA-3.0	ø3.0
RA11819	CHA-4.0	ø4.0

Selanjutnya akan dijelaskan mengenai skematik dari sistem pengontrol motor CNC dan sistem monitoring mesin *milling*.



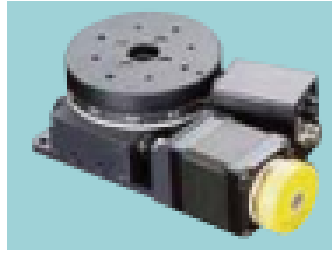
Gambar 3.50 Skematik control motor CNC dan monitoring

Untuk perangkat motor *stepper controller*, menggunakan tipe **DS 102** yang terbagi dalam tiga unit, dimana unit 1 untuk mengontrol motor sumbu X dan Y, unit 2 untuk mengontrol motor sumbu Z dan C, unit 3 untuk mengontrol motor sumbu A. Berdasarkan sistem *wiring* dimana kontroler unit 1 sebagai master, sedangkan kontroler unit 2 dan 3 sebagai *slave*. Kontroler unit 1 yang berkomunikasi dengan PC melalui kabel USB (*Universal Serial Bus*). PC yang memberikan perintah dalam bentuk pergerakan *jog* (menggerakkan arah *cutting tool* dengan manual) maupun program.

Untuk pergerakan tiap sumbu, menggunakan sistem *motorized table*. Dimana motor untuk menggerakkan sumbu X dan Y disusun per – *level*. Motor penggerak sumbu C berada pada satu *table* dengan sumbu X dan Y. Untuk motor sumbu Z dan sumbu A, posisi menempel pada *column* penopang *body machine tool*. berikut ini spesifikasi untuk tipe motor yang digunakan:

Tabel 3.78 Karakteristik Motor Penggerak [25]

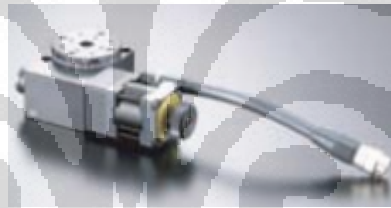
Motor Sumbu	Maks. <i>Stroke</i>	Resolusi	Kec. maksimum	Toleransi <i>moment load</i>	<i>Backlash</i>	Sensor
X dan Y (tipe KXC06-G)	20 mm	2 μm <i>full</i> / 1 μm <i>half</i> ; 0.1 μm <i>microstep</i>	20 mm/sec	5.0 kgf	0.5 μm atau kurang	<i>Limit sensor</i> dan <i>origin sensor</i>
Z (tipe KS302 -30)	30 mm	1 μm <i>microstep</i> /0.5 μm	10 mm/sec	9.0 kgf	0.5 μm atau kurang	<i>Limit sensor</i> dan <i>origin sensor</i>
A (tipe KS402-75)	360 ⁰	0.0025 ⁰ /pulsa (<i>full</i>)	25 ⁰ / sec (10 KHz)	10 kgf	0.005 ⁰ atau kurang	<i>Limit sensor</i> dan <i>origin sensor</i>
C (tipe KRW06260)	360 ⁰	0.004 ⁰ /pulsa (<i>full</i>)	20 ⁰ / sec (10 KHz)	3 kgf	0.05 ⁰ atau kurang	<i>Origin sensor</i>



Gambar 3.51 motorized table type KS402-75[17]



Gambar 3.52 motorized table type KXC0602-G [17]



Gambar 3.53 motorized table type KRW06360 [17]

Berikut ini, dijelaskan tahap persiapan sebelum proses pemesinan berlangsung:

1. Pastikan kompresor tidak mengandung air, kuras terlebih dahulu bila sudah mengandung banyak air. Pastikan tekanan kompresi sebesar lebih dari sama dengan 0.45 MPa (pada indicator tekanan di regulator).
2. Nyalakan DS motor *stepper controller* dan PC.
3. Proses pemasangan *cutting tool*, pastikan spindle pada posisi -90° untuk sumbu C dan pastikan pula *jack* selang *pneumatic* pada sisi samping *spindle* terlepas, sehingga tidak akan menabrak benda kerja. Pemasangan *cutting tool* diikuti dengan pemasangan *collet* dan pengencangan *tool holder* dengan kunci 8 dan 12. Sebelum pengencangan *tool holder*, pastikan panjang *cutting tool* sama dengan *tool setter*, dimana jarak tersebut diukur dari pangkal *clamping*

spindel untuk memastikan agar *cutting tool* tidak akan menabrak *fixture* saat diposisikan origin pada sumbu C.

4. Posisikan origin pada sumbu C terlebih dahulu dengan mengatur posisi koordinat dan kecepatan gerak di *interface controller* pada PC. Kemudian lanjutkan origin sumbu z, x, dan y secara berurutan.
5. Lakukan proses penempatan *cutting tool* pada koordinat origin di benda kerja, pada umumnya posisi origin ditempatkan di ujung titik sudut benda kerja. Lakukan secara hati – hati dan perhatikan *leveling* sumbu z serta kecepatan gerak motor.
6. Lakukan *uploading* program .prg kedalam *software interface motor controller* pada PC. Program .prg tersebut diproses melalui *post processor* terlebih dulu, seperti yang telah dijelaskan pada bab III.3.
7. Jalankan program pemesinan dengan meng – klik tombol *run*. Bila terjadi *error* pada proses pemesinan, klik tombol *stop*. Namun bila benar – benar dalam posisi terdesak, seperti *cutting tool* akan *gauging* pada benda kerja, matikan segera *drive motor stepper*.
8. Bila proses pemesinan telah usai. Posisikan *cutting tool* pada titik origin dan tutup keran *spindel*.

3.4.2. Spesifikasi *Cutting tool* yang Digunakan

Pada penelitian ini, proses pemesinan untuk “*micro mold*” menggunakan *cutting tool* tipe *solid end mill*. Berikut ini akan dijelaskan spesifikasi dari tiap *cutting tool* yang digunakan selama proses *machining*.

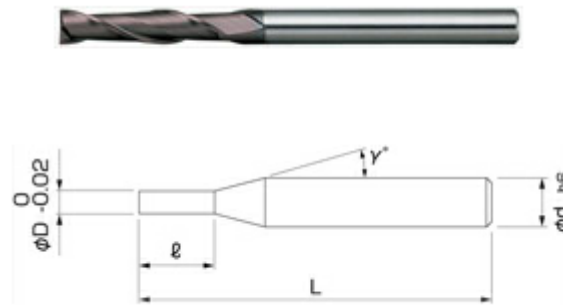
1. Flat end mill



Gambar 3.54 Flat end mill “ innova tool” [18]

Tabel 3.79 Dimensi cutting tool flat end mill [18]

Mill diameter	Shank diameter	Length of cut	Overall Length	Z	Article No.
0,20	4,0	0,5	50,0	2	133.002.00
2,00	4,0	5,0	50,0	2	133.020.00



Gambar 3.55 Flat end mill “NS Cutting tool” [19]

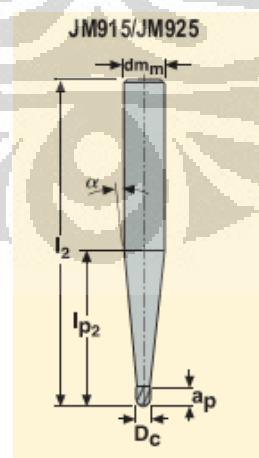
Tabel 3.80 Dimensi cutting tool flat end mill [19]

Code No.	(D) Dia.	(l) Length of Cut	(γ) Neck Taper Angle	(d) Shank Dia.	(L) Overall Length
08-00101-00050	0.5	2	9°	4	50

Dengan material coating yaitu nACro, merupakan campuran dari material aluminium, silicon, dan *chromium* [Standart Coating Application Chart]

Cutting tool yang digunakan selama proses pemesinan yaitu berdiameter 0.2 mm dan 2.00 dengan spesifikasi geometri seperti di atas.

2. Ball nose end mill

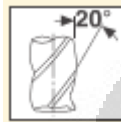


Gambar 3.56 Spesifikasi geometri ball nose end mill “SECO” [9]

Tabel 3.81 Dimensi cutting tool [9]

Part No.	Dimensions in mm						α°	z_n
	D_c	dm_m	l_2	l_3	a_p	ϵ		
9150010-MEGA-T	0,10	3	40	-	0,15	-	14°30'	2

Informasi tambahan:



(besarnya flute angle 20°)



(besarnya rack angle 4°)

Spesifikasi *coating* yang digunakan :

MEGA – T [9] dengan proses PVD (*Physical Vapour Deposition*) [9].

3.4.3. Spesifikasi Material *Workpiece* yang digunakan

Pada pemesinan kali ini, menggunakan material *Aluminium alloy* tipe AA 1100 dan *Steel ST 41* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Data material *Aluminium Alloy* tipe AA 1100.

- *Mechanical properties*

Tabel 3.82 *mechanical properties aluminium alloy* [20]

Properties	Conditions		
		T (°C)	Treatment
Density ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	2.71	25	
Poisson's Ratio	0.33	25	
Elastic Modulus (GPa)	70-80	25	
Tensile Strength (Mpa)	110		
Yield Strength (Mpa)	105	25	H12 more
Elongation (%)	12		
Reduction in Area (%)			
Hardness (HB500)	28	25	H12 more
Shear Strength (MPa)	69	25	H12 more
Fatigue Strength (MPa)	41	25	H12 more

- Komposisi

Element	Weight %
Al	99.00 (min)
Cu	0.12

Data material Steel

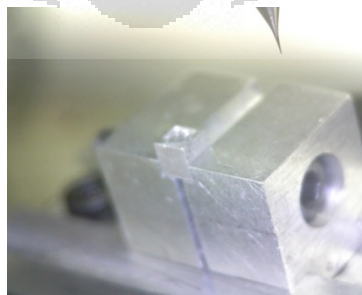
- Tipe : ST 41.
- Kekuatan tarik 41 kgf/mm [21].

3.4.4. Desain *Fixture*

Fixture yang digunakan dalam penelitian ini ada dua macam. Dimana keduanya memiliki fungsi dasar yang sama, menjepit benda kerja saat proses pemesinan. Yang membedakan kemampuan *traveler* fixture terhadap sumbu axis horizontal. Material yang digunakan *Duraluminium*. Merupakan kelas dari *aluminium alloy* yang terdiri dari campuran Aluminium murni diatas 90 % dengan 4 % tembaga; 0.5 – 1 % magnesium 0.1%; dan kurang dari 1 % komposisi mangan [36]. Berikut ini penjelasan desain fixture lebih lanjut.

Desain fixture 1

Sistematika pengunci menggunakan baut yang ditanamkan ke kedua *clamper*, dimana *clamper* kiri (dari gambar) memiliki ulir dalam untuk proses penguncian, sedangkan *clamper* kanan memiliki lubang sebesar diameter batang baut



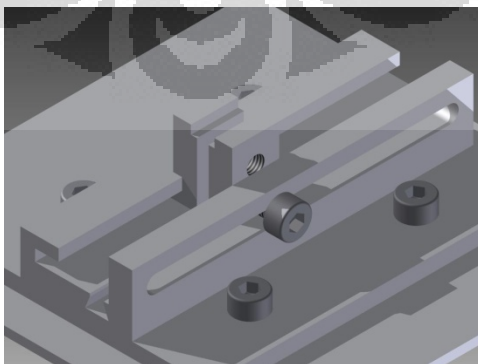
Gambar 3.57 Fixture 1

dan kepala baut (tanpa ulir dalam). Untuk sistematika *traveler* sumbu axis horizontal, *clamper* kiri di desain untuk tetap (*fix*) dan dibaut dari bawah, sedangkan *clamper* kanan di desain dapat digeser sejauh 12 mm terhadap *clamper* kiri dan bergerak sepanjang rel di bawah.

Kelebihan dari desain *fixture* ini adalah mudah digunakan, hanya mengencangkan baut penyangga antar dua *clamper* saja. Kekurangan, yaitu hanya *clamper* kiri yang bergerak *travelling* searah sumbu horizontal. Sehingga mengurangi ruang gerak *fixture*.

Desain fixture 2.

Sistematika penguncian menggunakan dua buah baut di kanan (dari gambar) dan di kiri, baut di kanan gambar mengunci *clamper* kanan terhadap rel *travelling horizontal*, sedangkan baut kiri mengunci *clamper* kiri terhadap *clamper* kanan yang di *setting fix*. Desain *fixture* ini memiliki kelebihan, yakni *clamper* kanan dan kiri dapat bergerak secara sumbu axis horizontal. Sehingga untuk pergerakan sumbu *rotary C* dapat diatur sebesar mungkin dengan jarak *travelling* motor sumbu horizontal (x dan y) yang di *set* hingga ujung ditambah jarak pergeseran *fixture* dan Kekurangannya, sedikit rumit dalam proses pemasangan pada *motorized table* dan saat pemasangan benda kerja harus pastikan kedua baut pengunci *clamper* benar – benar kencang pemasanganya.

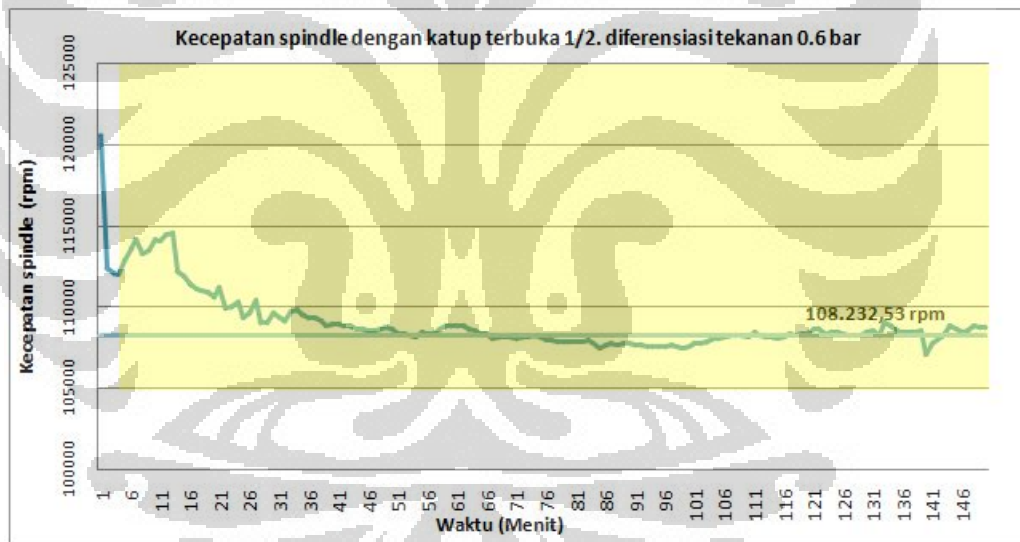


Gambar 3.58 Fixture 2

3.4.5. Karakteristik Kecepatan Spindle

Pada pengujian karakteristik kecepatan *spindle* yang dilakukan adalah mengukur kecepatan RPM *spindle* pada kondisi bukaan katup setengah. Pada katup terbuka $\frac{1}{2}$, ± 0.6 bar diferensiasi tekanan. Berikut ini hasil data tekanan dan waktu saat kompresor bekerja:

- Kompresor akan mulai bekerja di menit ke-2 dan akan terus bekerja hingga akhir pengujian, menit ke 150.
- Pada kondisi transisi, kecepatan maksimum yang tercatat adalah 120.582,8 rpm dan akan mengalami kondisi transien hingga menit ke-39.
- Pada menit ke-39 hingga ke-150, kecepatan tertinggi adalah 108.993,6 dan kecepatan terendah yang tercatat adalah 107.075,2. Sehingga deviasi kecepatan spindle yang terjadi pada interval ini adalah 1.918,4 rpm



Gambar 3.59 Grafik Karakteristik spindle saat kompresor dinyalakan

Keterangan : kondisi saat kompresor dinyalakan.

Dari data yang didapatkan, maka untuk proses pemesinan digunakan kecepatan spindle sebesar **108. 232,53 RPM** pada kondisi katup terbuka setengah.

3.1. Pengukuran dan Visualisasi *Scanning Electron Microscope*

Proses pengambilan data analisa yang dapat digunakan pada penelitian ini adalah penyajian visualisasi dari foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan menggunakan mikroskop digital. Untuk mengambil data gambar, lebih baik menggunakan *microscope* digital dengan alasan parameter ketajaman gambar dan pencahayaan yang lebih baik. Selain itu, *microscope* ini dapat mengambil foto maupun video secara *realtime*.

Untuk melihat benda kerja dengan sekilas, dapat menggunakan *microscope* analog dengan alasan lebih mudah dalam mengatur posisi benda kerja dan jangkauan penglihatan terhadap preparat lebih luas.

Untuk melihat hasil pemesinan lebih detail, dapat digunakan foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) seperti bagian – bagian *burr* dan chip pada permukaan hasil pelepasan material. Mode pengambilan gambar yang digunakan, SE (*Secondary Electron*).



Gambar 3.60 SEM [22]



Gambar 3.61 Dino Eye Digital Microscope [22]



BAB 4

HASIL DAN ANALISA PROSES PEMESINAN PADA “MICRO MOLD”

Setelah dilakukan proses pemesinan pada tiap model yang berbeda, waktu pemesinan dianalisa untuk mengetahui perbedaan waktu actual dan teoritis yang dihitung dari CAM software. setekah itu , dilakukan analisa selanjutnya berupa parameter yang dapat dianalisa dari hasil dokumentasi tersebut, antara lain: lokasi atau *areal* terjadinya burr dan *uncut chip* , efek *tool wear* terhadap hasil pemotongan, dan kesesuaian *surface* terhadap model yang di desain. Beberapa hasil dokumentasi penelitian dalam bentuk foto *Digital Microscope, Dino Eye (AM423X)* dan foto SEM.

4.1. Analisa *Cutting time theoretical dan actual*

Lamanya proses pemesinan bergantung pada *feed rate* dan jumlah *toolpath* dimana semakin banyak *toolpath* pada proses pemesinan, maka waktu operasi akan semakin lama. Pada subbab ini akan ditunjukkan perbedaan waktu pemesinan actual dan teorits. Waktu teoritikal dihitung berdasarkan hasil *toolpath generation software* CAM. Hasil pemesinan yang akan di analisa yaitu proses pemesinan model *Sculptured Surface* dengan material benda kerja *steel*.

Proses	Sculptured surface tipe male			
	Operasi	Cutting tool	Waktu teoritis	Waktu aktual
Facing	In Manual Program	Flat end mill 2.0 mm	3 menit	
Roughing	Face milling area	Flat end mill 2.0 mm	5 menit 57 detik	7 menit 10 detik
	Rest milling	Flat end mill 0.2 mm	53 menit 39 detik	2 jam 30 menit 34 detik
Semi finishing	Contour area	Ball nose end mill 0.1 mm	18 menit 18 detik	1 jam 46 detik
Finishing	Contour area	Ball nose end mill 0.1 mm	35 menit 32 detik	3 jam 20 menit
Total			1 jam 56 menit 26 detik	7 jam 1 menit 30 detik
Proses	Sculptured surface tipe female			
	Operasi	Cutting tool	Waktu teoritis	Waktu aktual
Facing	In Manual Program	Flat end mill 2.0 mm	3 menit	
roughing	Cavity Mill	Flat end mill 0.5 mm	5 menit 15 detik	30 menit 35 detik
	Corner rough	Flat end mill 0.2 mm	1 menit 16 detik	2 menit 19 detik
Semi finishing	Contour area I	Flat end mill 0.2 mm	7 menit 11 detik	30 menit 36 detik
finishing	Contour area II	Ball nose end mill 0.1 mm	32 menit 49 detik	3 jam 30 menit 25 detik
Total			49 menit 31 detik	4 jam 36 menit 55 detik

Gambar 4.1 Komparasi waktu pemesinan antara teoritis dan actual pada model sculptured surface tipe male dan female

Pada *Sculptured Surface* tipe *male* memiliki waktu total actual 7 jam 1 menit 30 detik, sedangkan waktu teoritis 1 jam 56 menit 26 detik. Waktu terlama pada proses pemesinan ini terdapat pada operasi *finishing* selama 3 jam 20 menit pada kondisi aktualnya. Sedangkan waktu teoritis sebesar 35 menit 32 detik. Waktu tercepat pada operasi *face milling areal* selama 7 menit 10 detik. Perbedaan waktu teoritis dan actual sebesar **5 jam 5 menit 16 detik**.

Pada *Sculptured Surface* tipe *female* memiliki waktu actual 4 jam 36 menit 55 detik, sedangkan waktu teoritis 49 menit 31 detik. Waktu terlama pada proses pemesinan model ini, terdapat pada operasi *finishing*, yaitu sebesar 3 jam 30 menit 25 detik untuk waktu actual, sedangkan waktu teoritis sebesar 32 menit 49 detik. Waktu tercepat pada operasi *corner rough*, dimana waktu yang digunakan selama 2 menit 19 detik berdasarkan waktu actual, waktu teoritis untuk operasi tersebut sebesar 1 menit 16 detik. Perbedaan waktu teoritis dan actual total pemesinan sebesar **3 jam 47 menit 24 detik**.

Faktor yang mempengaruhi waktu pemesinan antara lain:

- *Feed rate*
Sesuai dengan rumus *cutting time*, dimana perbandingan antara jarak pemakanan dan *feed rate*) [23]. Semakin besar *feed rate*, maka waktu pemesinan akan semakin cepat.
- Jarak pemakanan.
Semakin jauh jarak pemakan, maka semakin lama waktu pemesinan dengan asumsi bila *feed rate* yang digunakan konstan, bila *feed rate* yang digunakan berubah pada posisi tertentu, maka relative waktu pemesinan akan lebih cepat. Hal ini bisa terjadi bila kondisi kontur *dsigned surface* terlalu curam ke bawah sehingga harus mengurangi kecepatan potong karena pergerakan ke bawah juga dipengaruhi oleh percepatan gravitasi.
- *Engagement speed*.

Kecepatan pergerakan *cutting tool* dapat diatur untuk *non cutting move*, dimana terdiri dari gerakan *approach* yang bergerak dari titik *origin* ke areal *clearance area* sekitar *workpiece*, kemudian *engage* bergerak dari akhir gerakan *approach* hingga menyentuh *surface* yang akan dimakan. Gerakan *first cut* dimulai dari akhir *engage* sampai kedalaman dari *depth per cut* pemesinan yang diatur. Setelah itu, dilakukan *cutting move* hingga akhir *length of cut*, *cutting tool* akan *retract* menjauhi *workpiece* dan bergerak *depart* ke posisi *cutting line* selanjutnya. Pada pergerakan *non cutting move*, direkomendasikan agar *feed rate* diturunkan pada saat pergerakan *engage* dan *first cut*, sedangkan saat *retract* dan *depart* di setting lebih cepat.

- Banyaknya *layer* pemesinan.

Semakin banyak *layer* pemesinan yang di *setting*, maka waktu pemesinan akan semakin lama. Sehingga bila ingin mempercepat waktu pemesinan dapat dilakukan dengan mereduksi jumlah *layer* dan menambah *depth per cut*, asalkan nilai *depth per cut* yang di *set* masih dibawah nilai yang dianjurkan katalog *cutting tool*.

- Banyaknya CL – *point* yang ter – *generate* CAM system.

Dari hasil pengamatan yang dilakukan selama penelitian, semakin banyak CL – *point* yang ter – *generate* maka jarak antar CL – *point* akan semakin rapat sehingga akan memperlambat pergerakan *cutting tool* dan berdampak pada waktu pemesinan yang lebih lama. Hal ini dibuktikan pada perbedaan jumlah CL – *point* pada operasi *roughing* dan *finishing* dimana parameter yang beda adalah diameter *cutting tool*, *depth per cut*, *step over*, dan *tolerance band*.

- Faktor mekanis, seperti kondisi motor saat pergerakan *step* dan terjadinya *backlash*. Berhubung operasi pemesinan yang dilakukan berskala *micro*, maka faktor percepatan gerakan turun *cutting tool* juga mempengaruhi terutama saat bergerak di posisi kontur yang curam ke bawah.
- Faktor akumulasi dari iterasi pergerakan motor yang terjadi pada iterasi akhir dan *machining short line* dengan waktu *acceleration* dan *deceleration* pada

tiap awal dan akhir pergerakan diskrit motor. Sehingga menyebabkan *feed rate* aktual tidak pernah mencapai yang diinginkan [24].

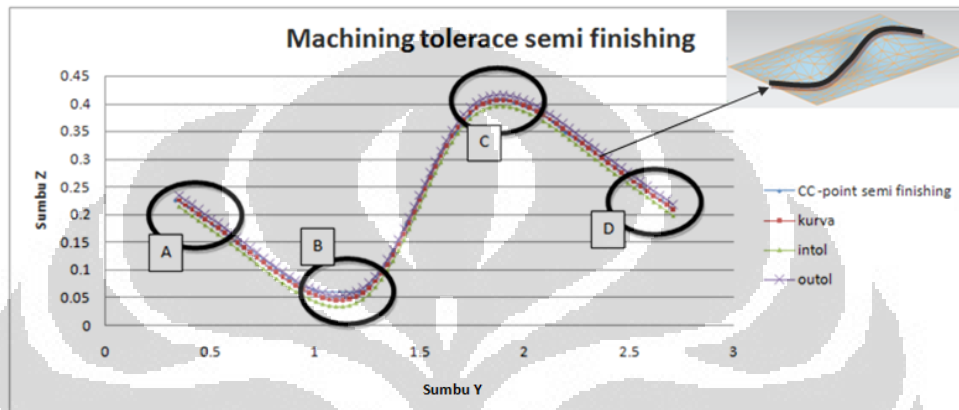
Perbedaan waktu pemesinan yang signifikan dapat dipengaruhi oleh faktor mekanis dan banyaknya *CL – point* yang ter – *generate*. Perhitungan waktu teoritis berdasarkan hasil *generate* simulasi pemesinan dengan *software* CAM, Simens PLM NX 8.0 sehingga ada kemungkinan waktu pemesinan yang dihitung oleh *software* didasari oleh panjang pemakanan dan faktor *feed rate* yang di *setting*. Perhitungan waktu pemesinan aktual dilakukan dengan timer yang dijalankan saat *running* pemesinan dijalankan dan waktu *stop* ketika proses pemesinan berhenti selesai proses atau pun bisa terjadi error yang menyebabkan *machine tool* berhenti bergerak. Timer akan *restart* saat proses *machining* diulang atau memulai program yang baru. Sehingga error yang terjadi pada pemesinan aktual bisa disebabkan oleh faktor mekanis, kesalahan pencatatan waktu meskipun kemungkinan kecil terjadi, dan banyaknya *CL – point*. Dari hasil percobaan, bila bobot *CL – file* yang digunakan *machining* sedikit (kurang dari 10.000 baris) maka waktu pemesinan aktual tidak berbeda jauh dengan teoritis, namun bila *CL – file* yang digunakan berbobot lebih dari 10.000 baris, maka waktu pemesinan aktual akan jauh lebih lama dibandingkan waktu pemesinan teoritis. Sedangkan, untuk nilai *feed rate*, panjang pemakanan, dan *cutting parameter* lainnya sama dengan kondisi teoritis.

4.2. Hasil dan Analisa Permukaan Hasil Pemesinan

4.2.1. Model Sculptured Surface

Pemesinan yang dilakukan model *sculptured surface* terdiri dari dua tipe program pemesinan, yaitu program awal penelitian dan program alternative, dimana keduanya telah dijelaskan pada bab sebelumnya (bab 3). Pada sub bab 4.2 ini, akan dijelaskan komparasi hasil pemesinan tiap operasi *roughing*, *semi finishing*, dan *finishing* dari foto SEM (*Scanning Electron Microscope*). Dibawah ini akan dianalisa hasil pemesinan model *sculptured surface* dengan material *steel* ST 41.

Pada operasi *semi finishing*, yang bertujuan mengurangi sisa operasi *roughing* yang menyisakan *z level surface* yang cukup besar. Sehingga untuk operasi *finishing* akan lebih mudah dilakukan. Untuk analisa hasil operasi *semi finishing*, akan membandingkan hasil akhir operasi tersebut dengan *cutting tool flat end mill 0.2 mm* dan *ball nose end mill 0.1 mm*.

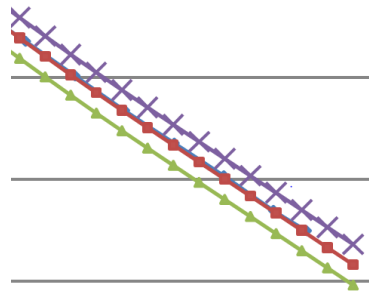


Gambar 4.2 Grafik Machining Tolerance pada operasi *semi finishing*

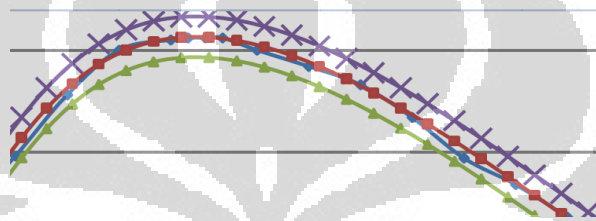
Analisa yang dilakukan adalah mengetahui posisi *cutter contact* dari informasi *CL – point* dan *designed surface* bagian tengah serta membentuk grafik *offset* yang disebut dengan *tolerance band* yang berfungsi sebagai, toleransi pemesinan. Bila posisi *cutter contact* berada di luar *tolerance band*, maka proses pemesinan tidak akan akurat.

Hasil analisa *CL – point* dan *tolerance band* proses *semi finishing*, untuk hasil pemesinan dengan *cutting tool 0.2 mm*, terlihat pada bagian lembah terdapat kedalaman yang tidak terjangkau oleh *cutting tool*.

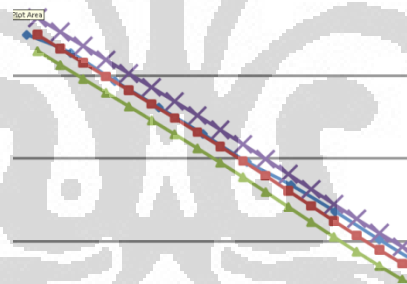
Grafik atas menjelaskan posisi *cutter contact point* yang berada di dalam *tolerance band* (*intol – outol*) serta bersinggungan dengan kurva yang merupakan *designed surface workpiece areal tengah sculptured surface*.



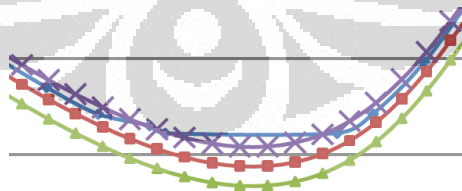
Gambar 4.3 Region A



Gambar 4.4 Region B



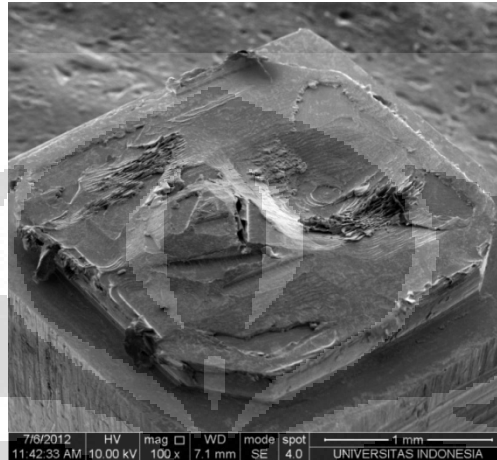
Gambar 4.5 Region C



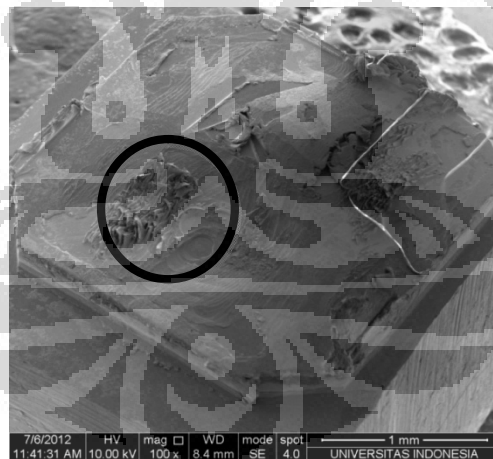
Gambar 4.6 Region D

Dari informasi grafik tiap *region*, terlihat pada *region A,C*, dan *D* menyatakan bahwa posisi *cutter contact* masih berada di dalam *tolerance band* dan menyentuh *designed surface* (garis kurva merah) tepat di atas, meskipun ada beberapa posisi

dimana *CC – point* tidak menyentuh *designed surface* pada Region B dan C. Sedangkan pada *region D* menyatakan posisi *CC – point* terlalu ke dalam *designed surface*. Pada region B terlihat garis *CC – point* sempit berada di luar *tolerance band* (ditandai dengan lingkaran hitam).



Gambar 4.7 Hasil akhir semi finishing cutting dengan tool flat end mill 0.2 mm
(Gambar A)

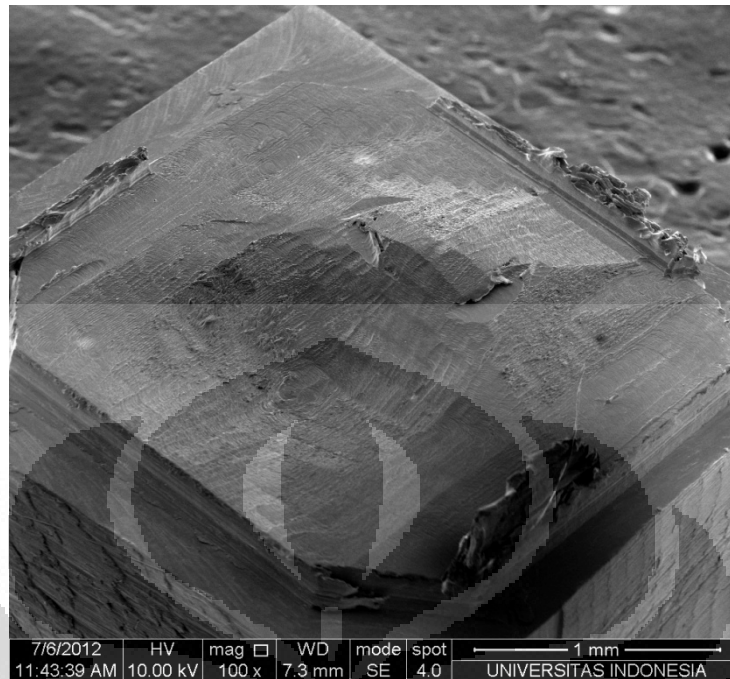


Gambar 4.8 Hasil akhir semi finishing cutting dengan cutting tool ball nose end mill 0.1 mm
(Gambar B)

Hal ini dikarenakan *cutting tool* yang digunakan berdiameter 0.2 mm *flat end mill*, sehingga *cutting edge* dan *tool face* tidak dapat menjangkau kedalaman lembah yang lebih kecil daripada diameter *cutting tool*. Lain halnya bila operasi dilakukan dengan

cutting tool ball nose end mill berdiameter 0.1 mm yang tentunya lebih kecil dari lebar kawah terdalam dan karena *ujung cutting tool* berbentuk *ball*, sehingga dapat melepaskan material yang berada di kawah terdalam dan lebih *smooth* mengikuti kontur kurva. Hal ini dibuktikan berdasarkan hasil foto SEM, dimana foto tersebut hasil operasi *semi finishing* dengan *cutting tool* 0.2 mm *flat end mill* (Gambar A) dan *semi finishing* dengan *cutting tool* 0.1 mm *ball nose end mill* (Gambar B). Dari perbandingan gambar di atas, terlihat permukaan gambar A lebih kasar dibandingkan gambar B, terutama di areal puncak dan kawah *surface*. Selain itu pada pinggir *surface* terlihat *burr* akibat dari pergerakan *side milling* dan tidak semua material terlepas. Sehingga dibutuhkan operasi *finishing deburring* pada sisi dinding *sculptured surface* menggunakan *cutting tool flat end mill*. Karena *cutting edge* yang berbentuk datar di bagian *face*, sehingga mampu membersihkan areal *burr* dengan pergerakan *cutting* secara *planar*.

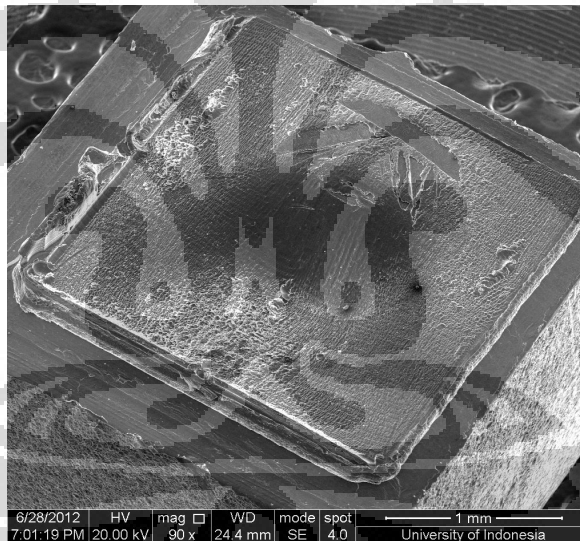
Pada gambar B, merupakan hasil *semi finishing* dengan *cutting tool ball nose end mill* 0.1 mm, terlihat permukaan kawah dan bukit hampir menyamai kontur *designed surface*. Namun masih terdapat *burr* disekitar sisi pertemuan antara kawah dan bukit (gambar B dilingkari hitam), hal ini disebabkan hasil dari operasi *roughing* sebelumnya yang masih menyisakan *chip* yang tidak terangkat. Serta diperlukan control kecepatan pemakanan saat melewati areal tersebut. Karena ada kemungkinan *cutting tool* bergerak terlalu cepat diakibatkan gerakan turun yang didukung oleh kecepatan gravitasi. Efek yang terjadi adalah areal tersebut memiliki kualitas pemesinan yang kasar. Selain, mengontrol kecepatan *cutting tool* saat turun, menghilangkan *burr* disekitar areal pertemuan bukit dan lembah dapat diantisipasi dengan penambahan layer *finishing* sebanyak minimal tiga layer.



Gambar 4.9 Hasil akhir finishing material workpiece steel

Gambar di atas hasil operasi *finishing* dua layer dengan *cutting tool ball nose end mill* 0.1 mm. terlihat perbedaan setelah dilakukan *finishing* dan sebelum. Areal *burr* yang masih ada setelah operasi *semi finishing* telah hilang setelah dilakukan *finishing*. Namun ada beberapa kekurangan pada sisi samping masih terdapat chip berukuran besar sebelah kanan dan kiri sisi dinding *sculptured surface* yang belum terangkat. ini merupakan sisa operasi *roughing* yang melepaskan material sekitar dinding. Karena operasi *roughing* menggunakan *cutting tool* berdiameter 2.0 mm sedangkan pada operasi *finishing* menggunakan *cutting tool* berdiameter 0.1 mm sehingga sulit untuk melepaskan chip yang dihasilkan dari pemotongan *cutting tool* yang 20 kali lebih besar dari *cutting tool finishing*. Akibatnya, chip yang dihasilkan berukuran besar pula dan sulit untuk dilepaskan dengan *cutting tool* berukuran kecil. Solusi untuk menghilangkan chip tersebut sama dengan saat operasi *semi finishing*, yaitu sebelum *finishing overall* dijalankan, terlebih dulu dilakukan *wall finishing* untuk membersihkan chip disekitar dinding hasil pemesinan dengan *cutting tool flat end mill* berdiameter 0.2 mm dengan alasan hasil chip yang dihasilkan *cutting tool* 0.2 mm masih dapat dibersihkan dengan *cutting tool* 0.1 mm.

Untuk hasil pemesinan model *sculptured surface* dengan material Aluminium alloy AA 1100 lebih banyak menghasilkan burr yang terjadi di sekeliling *machined wall*. Hal ini didukung oleh karakteristik material aluminium yang lebih *ductile*, sehingga bila dilakukan proses pemesinan, chip yang terjadi lebih sulit lepas dibandingkan material *steel*. Gambar dibawah ini, merupakan hasil operasi *finishing* dengan *cutting tool* 0.1 mm *ball nose end mill*. Solusi yang digunakan untuk menghilangkan burr sekitar *machined wall* antara lain melakukan operasi *finishing deburring* dengan *cutting tool* 0.2 mm *flat end mill* untuk menghilangkan *chip* yang tidak terangkat oleh operasi *finishing* sebelumnya. Solusi kedua, direkomendasikan menggunakan *cutting tool coating* TiCN (Titanium Carbonitride) untuk *workpiece aluminium* [25], karena selama proses pemesinan, *coating cutting tool* yang digunakan adalah nACro yang justru lebih bagus untuk *workpiece steel*.

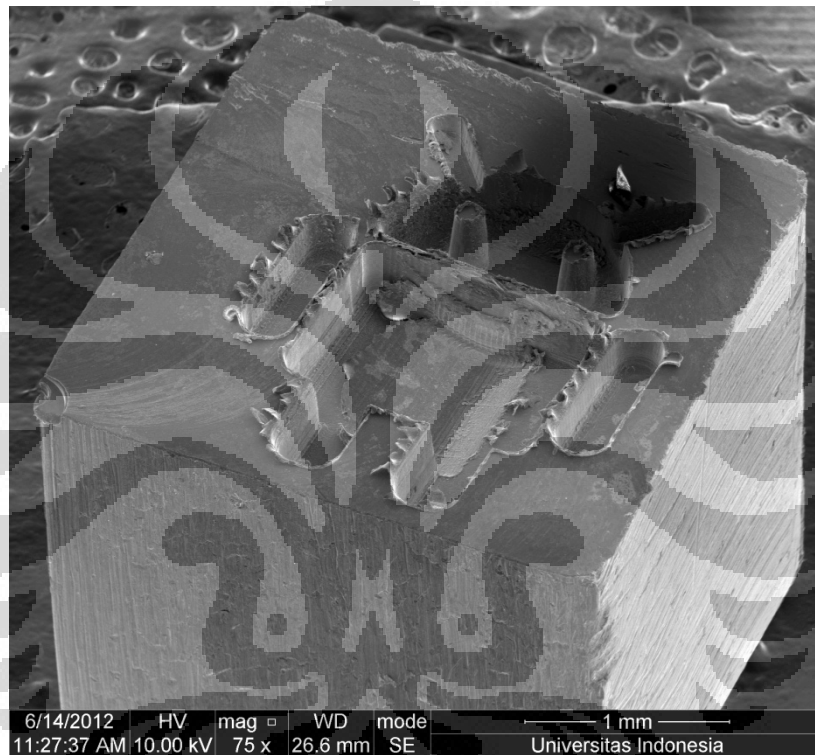


Gambar 4.10 Hasil akhir finishing material workpiece aluminium alloy

4.2.2. Model Android

Analisa hasil pemesinan model *android* akan membandingkan operasi *finishing* dengan *cutting tool* 0.2 mm *flat end mill* dengan *cutting tool* 0.1 mm *ball end mill*. Pada gambar di bawah ini merupakan hasil *finishing* dengan *cutting tool* 0.1 mm *ball nose end mill* dengan dua *layer* pemesinan. Terlihat pada hasil pembentukan areal badan yang berbentuk cekung ke dalam hampir menyamai *designed surface*. Namun

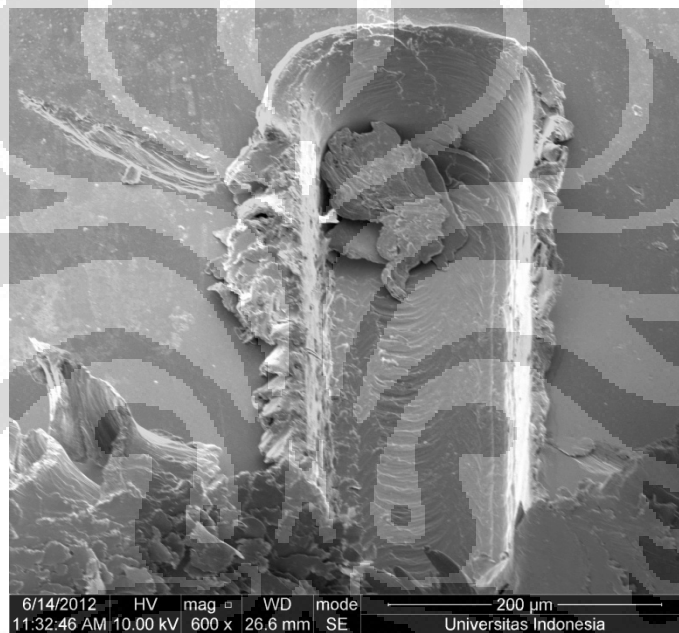
bila dilihat dari dekat, masih terdapat *burr* hasil operasi *roughing* di sekitar pinggir atas *machined wall*. Contoh lebih spesifik pada areal tangan model, dimana operasi pemesinan dilakukan seolah membentuk *channel* sempit yang hanya dapat dilalui *cutting tool* berdiameter 0.1 mm. karena geometri dasar berbentuk kurva, lebih tepat menggunakan *ball nose end mill* sehingga areal cekungan masih dapat dilalui oleh *cutting edge*.



Gambar 4.11 Hasil akhir finishing model android tipe female

Solusi untuk menghilangkan *chip* sekitar *wall* sama dengan yang dilakukan pada pemesinan *sculptured surface*, yaitu operasi *wall finishing* dilakukan setelah operasi *finishing overall*. Untuk lebih menghaluskan permukaan *surface* areal badan dan kepala, dilakukan dengan menabah *layer* pemesinan, sehingga *chip* yang tidak terlepas pada operasi *finishing layer* kedua dapat diantisipasi dengan pelepasan material saat operasi *finishing layer* ketiga dijalankan. Selain itu, faktor dari kondisi *cutting tool* juga mempengaruhi kualitas permukaan. *Cutting tool* yang aus tidak menyentuh *machined surface* dengan sempurna, ada daerah yang tidak ter – *contact*

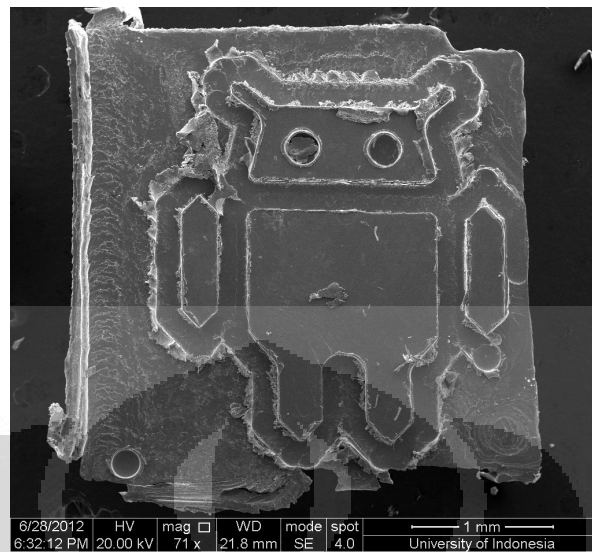
sehingga *z – level* sisa pelepasan material masih tinggi. Efek *build up edge* juga mempengaruhi kualitas kekasaran permukaan, karena material *workpiece* yang digesek secara terus menerus oleh *cutting edge*, akan berubah struktur kristal menjadi lebih lunak akibat kenaikan temperature dan menempel pada areal *cutting edge* serta membentuk lapisan baru pada *cutting edge*, lapisan *built up edge* pada permukaan *cutting edge* seolah membuat lapisan *cutting edge* bertambah, bukan semakin tipis karena aus. Justru kualitas lapisan tersebut tidak setajam *cutting edge* yang asli dan menghasilkan kualitas permukaan yang buruk.



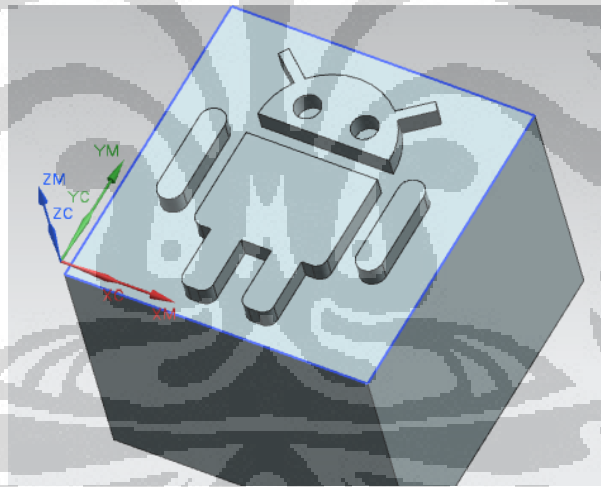
Gambar 4.12 Channel pada areal model android tipe female

Pada gambar di bawah ini, hasil *finishing* dengan *cutting tool* 0.2 mm *flat end mill* dengan operasi *deburring* disekitar dinding model. Kelemahan proses pemesinan ini adalah saat operasi *finishing overall* menggunakan *cutting tool* 0.2 mm, sedangkan untuk hasil yang lebih baik justru menggunakan *cutting tool* 0.1 mm agar dapat membantuk areal kurva khususnya pada kepala, tangan, dan kaki model.

Untuk kualitas permukaan samping model justru lebih baik dibandingkan operasi pemesinan pada model sebelumnya.



Gambar 4.13 Hasil finishing deburring pada model android tipe male



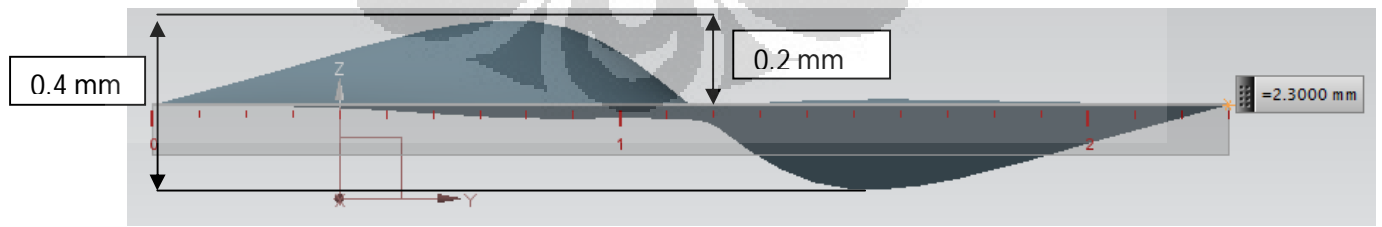
Gambar 4.14 CAD model android tipe male

BAB 5

ANALISA LINTASAN PAHAT OPERASI *FINISHING*

Operasi *finishing* merupakan step pemesinan terakhir dalam proses pemesinan manufaktur, dimana proses tersebut memakan sisa *part stock* dari proses *roughing* dan menghaluskan permukaan benda kerja. Dalam operasi ini, nilai *step over* dan *depth per cut* di – *setting* dengan nilai yang kecil, sehingga *scallop heigh* yang dihasilkan akan lebih kecil dan kekasaran permukaan akan lebih kecil pula. Pada skala produksi industry, proses *finishing* akan menentukan tingkat toleransi dan kepresisian suatu produk. Oleh karena itu, sangat penting dalam menentukan pola *toolpath* pada proses *finishing*. Operasi *finishing* yang dianalisa pada skripsi ini, pada proses pemesinan *male sculpture surface* dengan dua *layer* operasi. Pada analisa *toolpath* operasi *finishing* dilakukan pada *layer* kedua, dimana *layer* tersebut mencakupi *tool path* yang sejajar dengan kurva *surface* yang akan dibentuk. Bagian *toolpath* yang di analisa terdapat di tengah *Sculptured Surfaced*. Areal tengah *Sculptured Surfaced* di *slicing* hingga mendapatkan gambar dua dimensi dari kurva yang membentuk permukaan bukit dan lembah. Berikut ini aspek yang akan dianalisa:

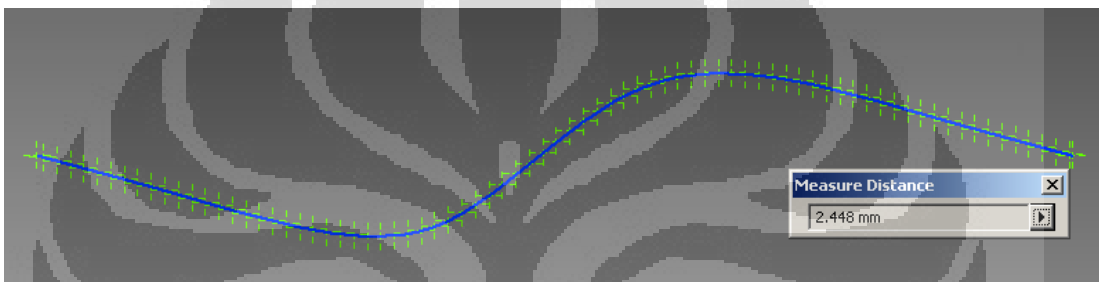
1. Analisa jumlah CL – *point* pada tengah *Sculptured Surfaced*
2. Analisa Region dari Kurva *Machining Tolerance* dan CL – *Curve*.
3. Hasil dan Analisa posisi *cutter contact* terhadap permukaan benda kerja



Gambar 5.1 Dimensi Sculptured surface untuk “micro mold”

5.1. Analisa jumlah CL – point pada tengah *Sculptured Surfaced*

Untuk menganalisa jumlah CL – point pada tengah surface, harus didapatkan CL – file terlebih dahulu dengan men – generate program *machining* yang telah di verifikasi bebas *collision* dan *gauging*. Kemudian dilanjutkan dengan mencari *tool path* yang sejajar dengan bagian tengah *Sculptured Surfaced* sehingga membentuk kurva dengan dua dimensi seperti gambar di atas. Sehingga akan didapatkan CL – curve dari keterhubungan CL – point yang berada di tengah *Sculptured Surfaced*.



Gambar 5.2 Dimensi panjang CL – point

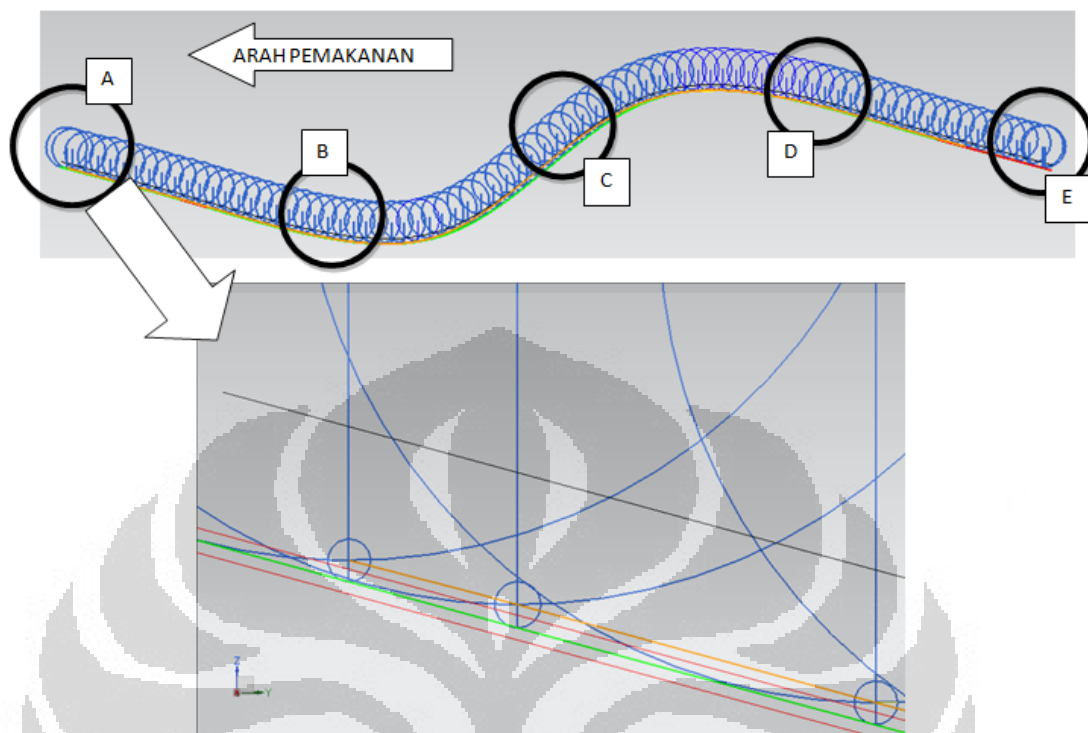
Jumlah CL – point sepanjang lintasan CL – curve sebanyak 79 point untuk panjang kurva 2.448 mm. sehingga banyaknya CL – point rata – rata sebesar :

$$79 \text{ point} / 2.448 \text{ mm} = \underline{\underline{32 \text{ CL – point per mm.}}}$$

5.2. Analisa Region dari Kurva *Machining Tolerance* dan CL – Curved.

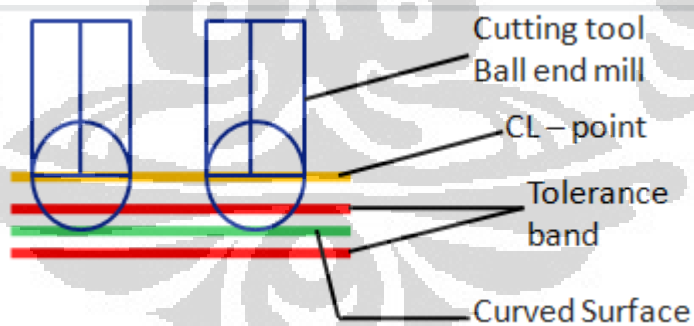
Setelah mendapatkan nilai koordinat CL – point dan *curve surface* pada setiap model yaitu “*micro mold*” dapat dianalisa tingkat kepresisian pada proses pemesinan yang akan mempengaruhi hasil akhir permukaan benda kerja. Proses pem visualisasi kurva tersebut dapat dilakukan di *software* Siemens PLM NX 8.0.

Berikut ini akan digambarkan secara rinci hasil perpaduan antara CL – cuve dan *curve surface*, serta *tolerance band* yang terdiri dari intol – outol berada di *offset curve surface*.



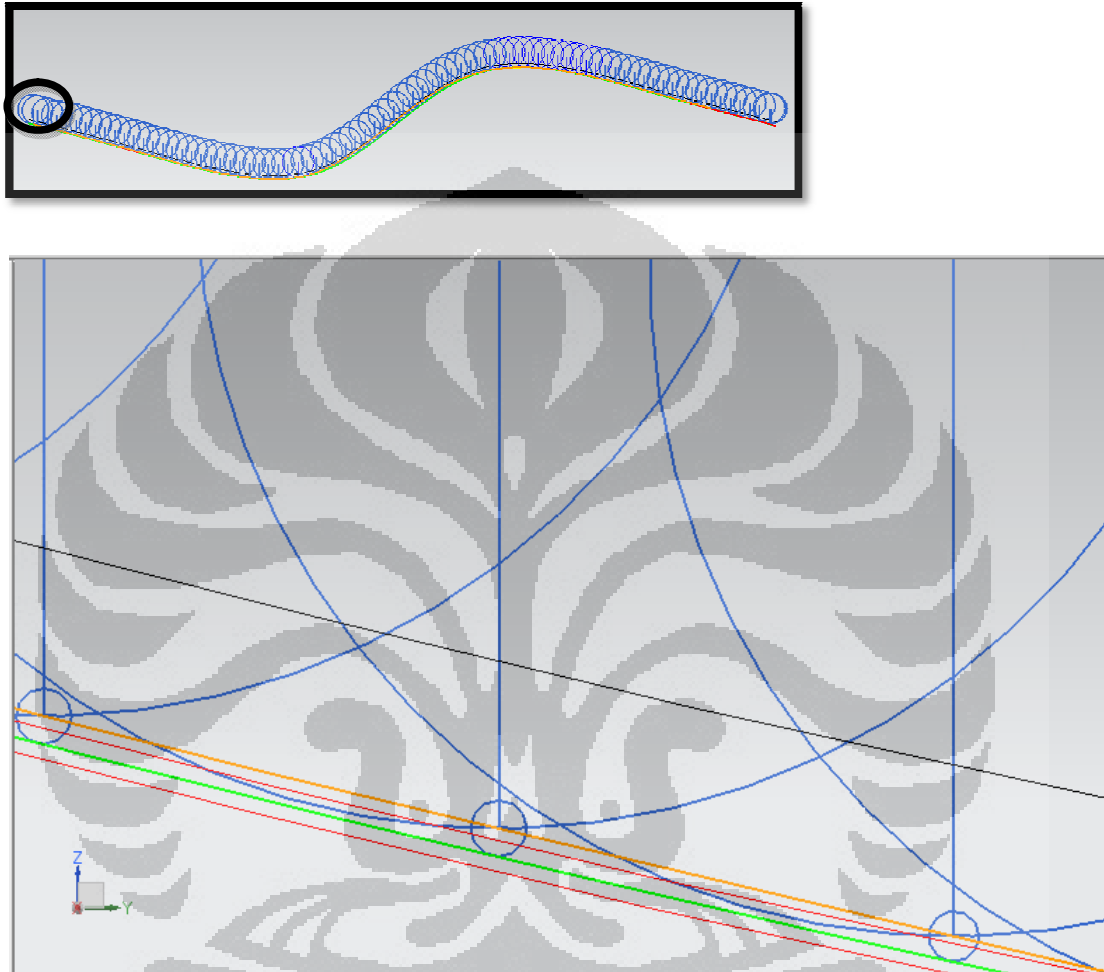
Gambar 5.3 Machining tolerane operasi finishing model sculptured surface tipe male material aluminium

Keterangan :



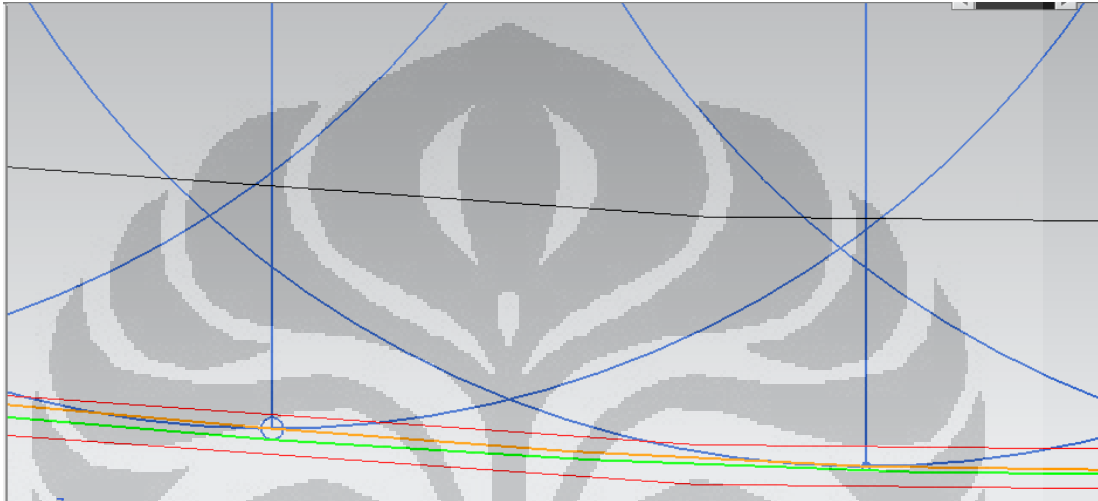
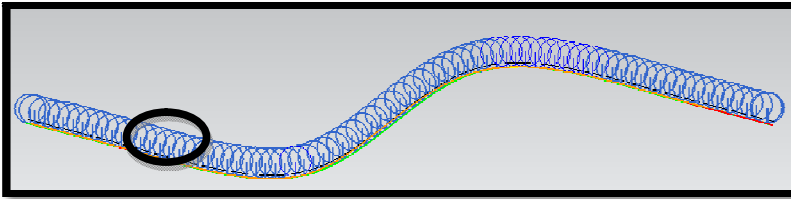
Visualisasi kurva *machining tolerance* pada “*micro mold*”

REGION A



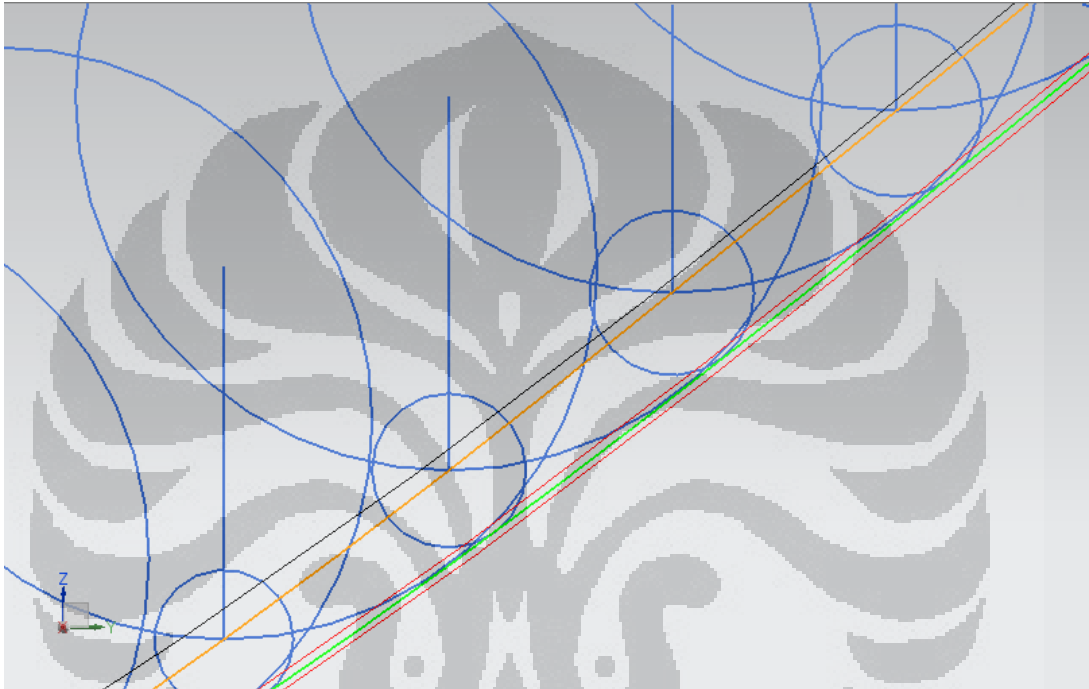
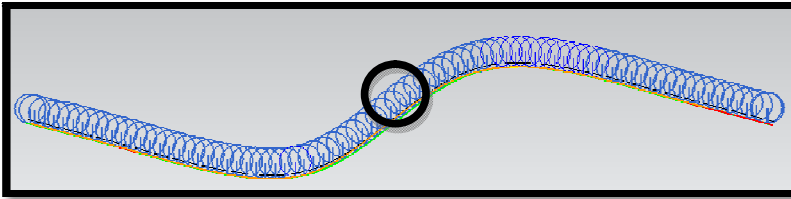
Gambar 5.4 Region A dari machining tolerance finishing

Dari gambar di atas menjelaskan bahwa ujung *cutting tool* (garis biru) berada di dalam areal *tolerance band* dan tidak menyinggung permukaan kurva desain (garis hijau), *Region* di atas terjadi pada saat *cutting tool* akan melakukan *retract*.

REGION B

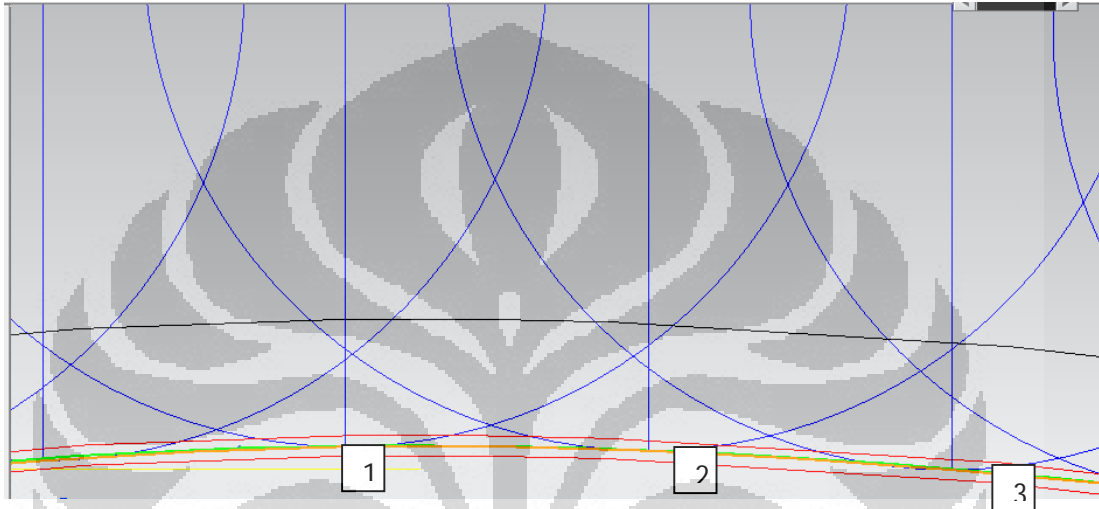
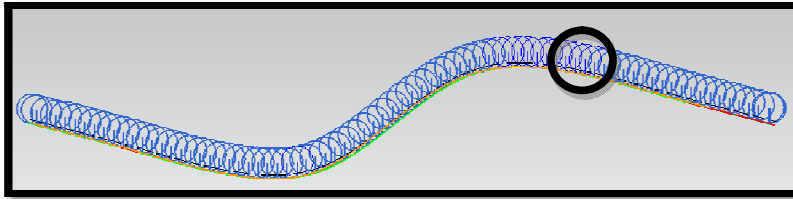
Gambar 5.5 Region B dari machining tolerance finishing

Gambar di atas menjelaskan satu sisi *cutting tool* tidak menyinggung kurva desain dan pada saat bergerak searah pelepasan material, *cutting tool* mulai menyinggung kurva desain. Hal ini terbukti dari pengamatan visual antara ujung *cutting tool* yang berwarna biru bersinggungan dengan kurva desain warna hijau. Region ini terjadi pada saat *cutting tool* bergerak di areal kawah *sculptured surface*. Namun posisi ujung *cutting tool* masih aman berada di dalam jangkauan *tolerance band* (garis warna merah).

REGION C

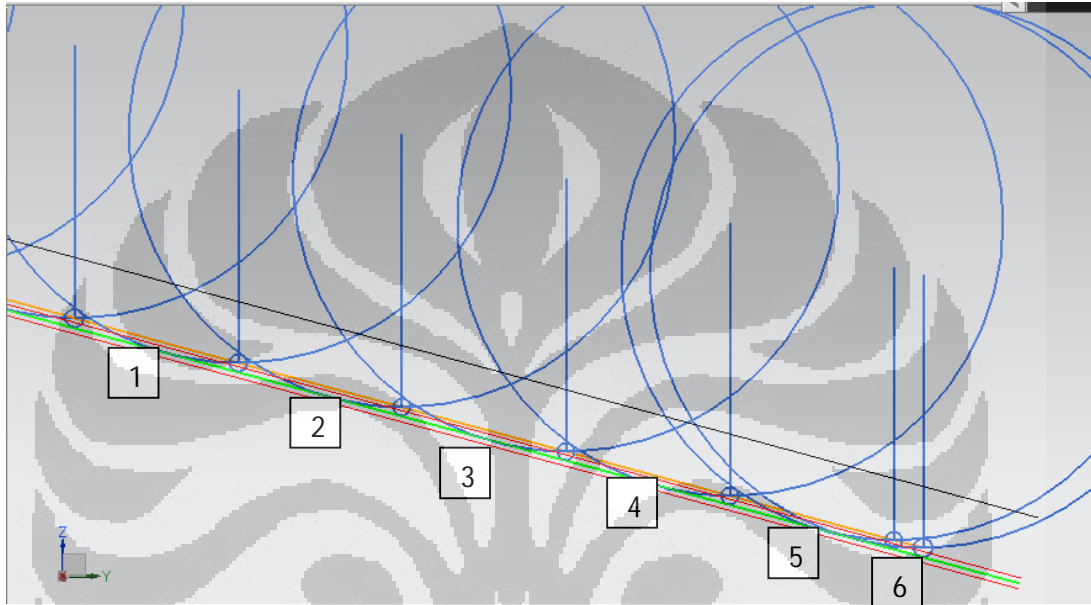
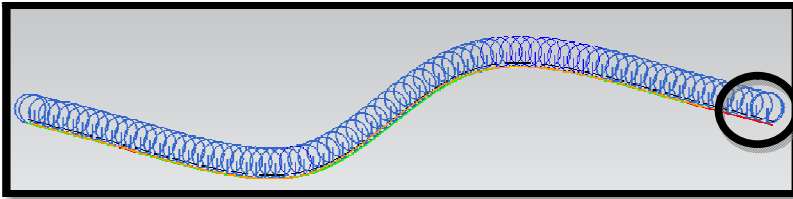
Gambar 5.6 Region C dari machining tolerance finishing

Gambar di atas menjelaskan bahwa *cutting tool* secara sekuensial bergerak menanjak dan keempat ujung *cutting tool* masih menyentuh kurva desain dan berada di dalam areal *tolerance band* (garis warna merah). *Region* ini terdapat di areal ketika *cutting tool* berada di titik persinggungan geometri antara bukit dan lembah permukaan.

REGION D

Gambar 5.7 Region D dari machining tolerance finishing

Gambar di atas menjelaskan bahwa ujung *cutting tool* masih berada di dalam areal *tolerance band*. Bila dilihat secara *zooming*, terlihat bahwa pada posisi no 1, kepala *cutting tool* terlalu berada di dalam areal kurva desain. Posisi nomor 2, menyatakan *cutting tool* bersentuhan / *contact* dengan kurva desain dan terakhir pada posisi 3 menyatakan *cutting tool* kembali berada terlalu kedalam areal kurva desain. *Region* ini berada pada posisi dimana *cutting tool* berada puncak / bukit *sculptured surface*.

REGION E

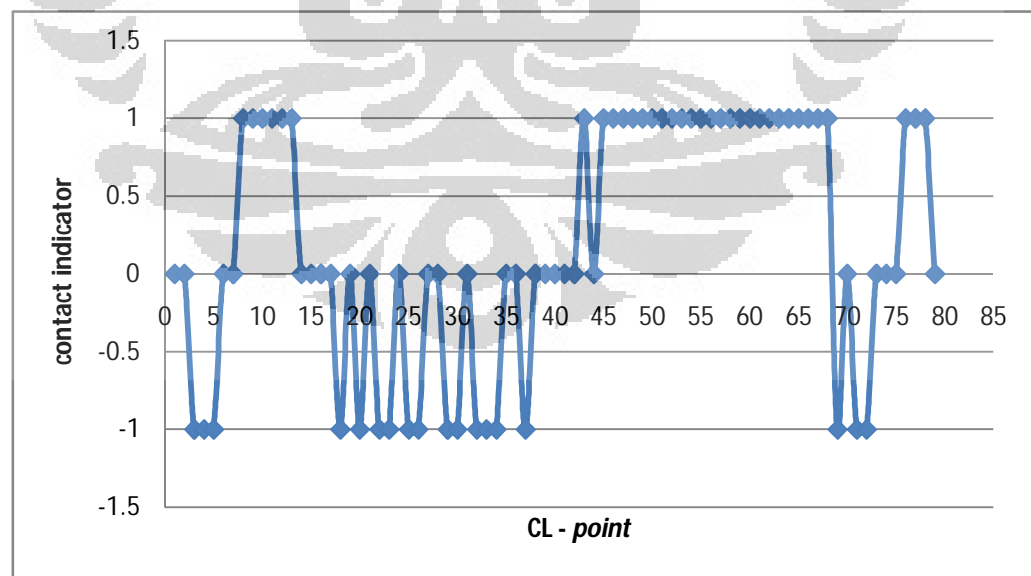
Gambar 5.8 Region E dari machining tolerance finishing

Gambar di atas menjelaskan bahwa *cutting tool* masih berada di dalam jangkauan *tolerance band* dan bila diperlihatkan dengan jelas bahwa ujung *cutting tool* menyentuh desain *surface* pada pergerakan *cutting tool* nomor 1 sampai dengan nomor 2, kemudian *cutting tool* berada terlalu di dalam kurva desain *surface* pada posisi nomor 3 dan 4. Kemudian *cutting tool* kembali pada posisi menyentuh kurva desain pada posisi nomor 5 dan 6. Pada posisi nomor 6 dan 5, *cutting tool* berada pada posisi mulai proses pelepasan material setelah melalui pergerakan *first cut*. Sehingga region E ini bisa dikatakan kondisi dimana proses pelepasan pertama material *workpiece* sesuai *depth per cut* yang telah di setting.

5.1. Analisa penyebaran *Cutter Contact* di dalam *Tolerance Band*

Untuk mengetahui tingkat *machining accuracy* pada hasil pemesinan, maka diperlukan lokasi atau posisi *cutter contact*, yaitu titik persinggungan antara *cutting tool* dengan *surface* yang dimakan. Keberadaan *cutter contact* dapat dilihat secara visual, namun untuk mengetahui posisi koordinat yang tepat, tidak dapat dilihat secara visual mata. Oleh karena itu, pada sub – bab analisa ini menggambarkan apakah kepala *cutting tool* menyentuh kurva benda kerja, atau ujung *cutting tool* terlalu kedalam permukaan kurva benda kerja, bahkan *cutting tool* tidak menyentuh *surface* kurva.

Kurva yang dipaparkan dibawah ini, menjelaskan bila nilai indikator menunjukkan nol, maka *cutting tool* **menyentuh tepat di atas *surface***, bila nilai indikator menunjukkan satu, maka *cutting tool* **tidak menyentuh *surface***, dan bila nilai menunjukkan minus satu, maka *cutting tool* **terlalu masuk ke dalam kurva *surface***. Meskipun *cutting tool* tidak atau terlalu memotong *surface*, namun **kondisi ini masih didalam toleransi *intol* dan *outol***. Hal ini dibuktikan pada analisa bab sebelumnya yang memaparkan kurva dari *machining tolerance* tiap *region* pada *toolpath finishing*.



Gambar 5.9 Grafik posisi *cutter contact* terhadap permukaan *workpiece*

Dari grafik di atas menjelaskan bahwa *cutting tool* menyentuh tepat di atas kurva *surface* terjadi sebanyak 27 kali dengan posisi *contact* terhadap *surface* terlama antara CL – *file* ke 14 sampai 17. Kemudian dilanjutkan pada posisi CL – *point* ke 19, 21,24, 27, 28, 31, 35, 36 38 – 42, 45, 70, 73 – 75, dan terakhir pada posisi CL – *point* 79.

Sedangkan pada kondisi *cutting tool* tidak bersentuhan dengan *surface workpiece* terjadi pada CL – *point* ke 7 – 12, kemudian terjadi di CL – *point* 44, 46 sampai 68, dan terakhir terjadi pada CL – *point* 76 sampai 78.

Tabel 5.1 Pengelompokan jumlah posisi cutter contact

POSISI	JUMLAH
Cutting tool bersentuhan dengan kurva desain	27
Cutting tool tidak bersentuhan dengan kurva	34
Cutting tool terlalu ke dalam kurva desain	15

Untuk posisi *cutting tool* terlalu melampaui *kurva surface* terjadi pada CL – *point* ke 2 sampai 4, kemudian terjadi pada CL – *point* ke 18, 20, 22,23,25,26, 29,30, 32 – 34, 37, 69, 71, dan terakhir terjadi pada CL – *point* ke 72.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

Dari hasil analisa dan percobaan yang dilakukan selama proses pemesinan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Meskipun posisi *cutting tool* tidak bersentuhan dengan kurva desain lebih banyak daripada ketika bersentuhan dengan kurva, namun posisi *cutter location* masih berada didalam *tolerance band*. Ini terbukti dari pengambilan lima sampel posisi *cutting tool* pada kurva *machining tolerance*. Sehingga dari hasil analisa toolpath operasi *finishing*, menyatakan bahwa *software CAD/CAM Siemens PLM NX8.0* mampu digunakan pada operasi pemesinan *micro products*
- Kualitas permukaan hasil pemesinan model *Android* masih belum cukup memuaskan. Masih terdapat *burr* yang tidak terangkat oleh *cutting tool* dan membutuhkan operasi *finishing* yang lebih baik
- Kualitas permukaan hasil pemesinan model *sculptured surface* cukup memuaskan. Dibuktikan, permukaan bukit dan lembah dapat terbentuk hampir menyamai *designed surface*. Hanya saja membutuhkan operasi *wall finishing* setelah operasi *finishing* total.
- Hasil pemesinan dengan material *aluminium alloy* menghasilkan tingkan *chip* yang tertinggal selama operasi pemesinan lebih banyak dibandingkan dengan pemesinan material *steel*.
- Deviasi waktu aktual dengan teoritis pada pemesinan model *sculptured surface* untuk tipe male dan female sebesar **5 jam 5 menit 16 detik** dan **3 jam 47 menit 24 detik**. Dimana pada kenyataan, waktu teoritis lebih cepat dibandingkan waktu aktual.

- Semakin banyak CL – *point* yang digunakan proses pemesinan, maka operasi pemesinan akan semakin lama dan deviasi antara waktu pemesinan aktual – teoritis akan semakin besar.
- Semakin kecil nilai *tolerance band* (*intol- outol*) pada operasi pemesinan, maka akan menghasilkan CL – *point* yang semakin rapat dan menambah bobot memori CL – *file*, serta kualitas permukaan hasil pemesinan semakin baik dan waktu pemesinan akan semakin lama
- Pada proses pemesinan skala mikro, dibutuhkan sistem *cutting fluid* yang bertekanan rendah dan mampu membuang chip dari *workpiece*. Hal ini menghindari patahnya *cutting tool* bila disemprotkan dengan *fluida* bertekanan rendah.
- Proses pemesinan *micro milling* membutuhkan tingkat kepresisian dan ketelitian tinggi. Karena dengan sedikit saja error yang terjadi, akan menghasilkan kualitas *machined surface* yang buruk

Saran penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

- Dibutuhkan mekanisme pengukuran yang teliti untuk mendeteksi posisi *origin cutting tool* terhadap *workpiece*
- Dibutuhkan mekanisme *tool setter* yang mampu menyesuaikan panjang *cutting tool* dengan presisi
- Menggunakan *cutting fluid* yang mampu memberikan kualitas akhir pemesinan jauh lebih bagus daripada saat ini
- Mekanisme yang mampu mendeteksi dan *monitoring tool life*.

DAFTAR PUSTAKA

Takács, M. Verö, B. Mészáros, I. “ Micromilling of metallical materials” Journal of Material Processing of Technology 2003;138;152 – 155.

Kiswanto, Gandjar. “Slide Materi Kuliah Proses Produksi (Manufacturing Process)”. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kiswanto, Gandjar . “Slide Materi Kuliah CAD / CAM ”. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

King Fahd University of Petroleum and Materials.” Cutting Tool Materials, hand out 10”

Shpitalni, M. Koren, Y. Lo, C C. “ Realtime Curve Interpolation” Computer – Aided Design Volume 11, 1994;0832-07;833.

Main Catalog Cutting Tool SECO JABRO 2012

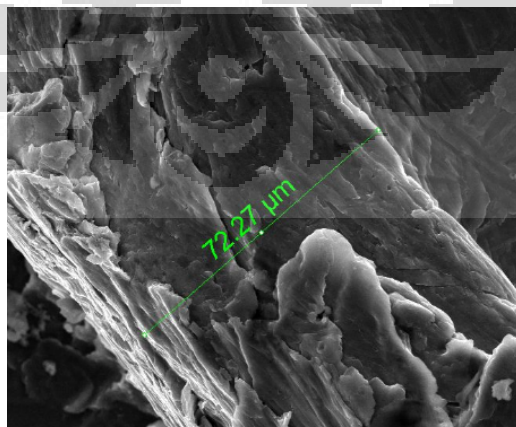
DAFTAR ACUAN

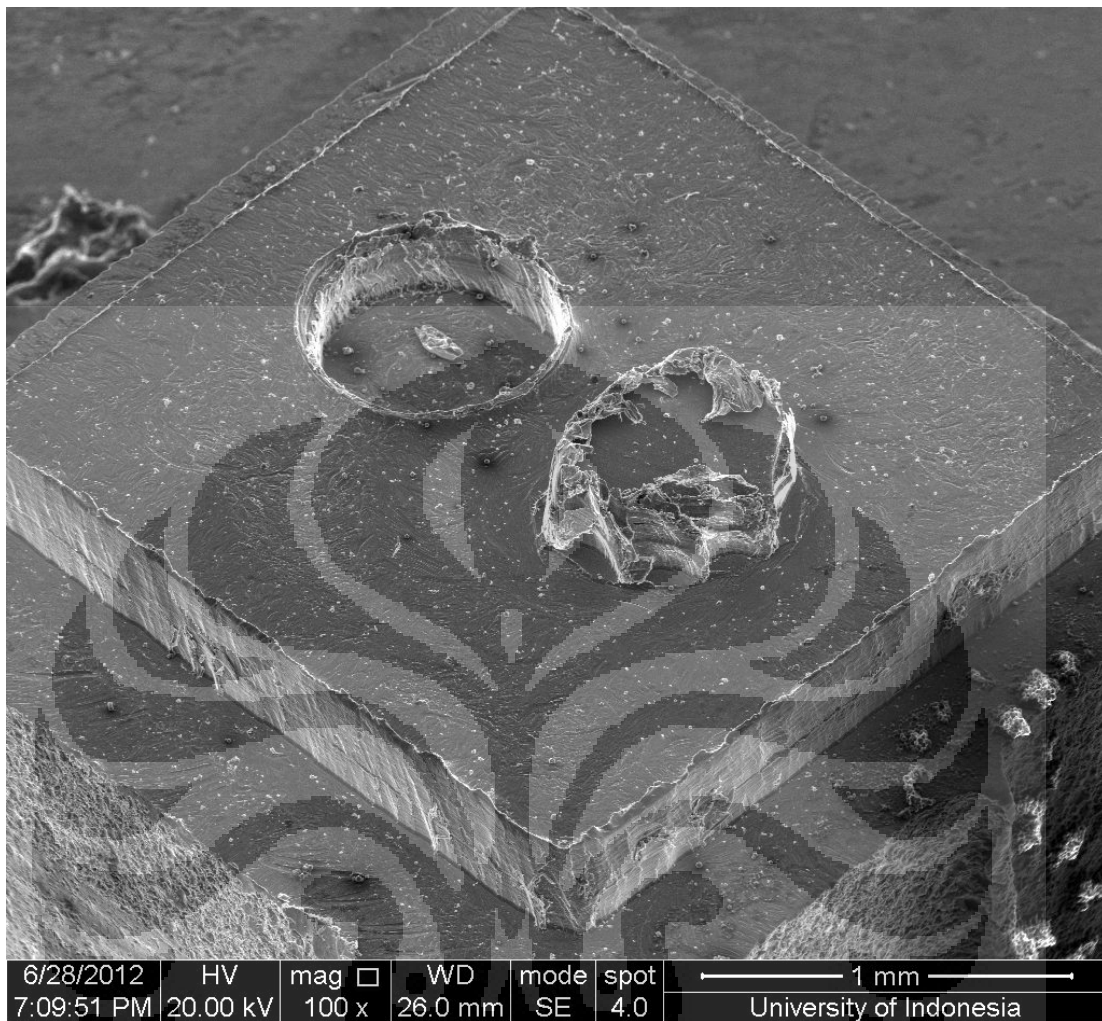
- [1] Takács, M. Verö, B. Mészáros, I. “Micromilling of metallical materials”
Journal of Material Processing of Technology 2003;138;152 – 155.
- [2] Kiswanto, Gandjar. “Slide Materi Kuliah Proses Produksi (Manufacturing Process) halaman 15 - 16”.Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- [3] <http://goldagus.blogspot.com>. diunduh 10.00 AM 1/6/2012
- [4] Micro injection molding, Vishu Shah, Consultek
- [5] Buku Madou, *Fundamental of Microfabrication*
- [6] <http://harisok.blogspot.com/2010/05/dasar-dasar-proses-permesinan.html>
diunduh 10:15 AM 1/6/2012
- [7] Kiswanto, Gandjar . “Slide Materi Kuliah Proses Produksi (Manufacturing Process), halaman 295 – 297 ”. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- [8] <http://cncestablishment.com/axis-cnc-machine-guide-get-best> diunduh 11:00 AM 1/6/2012
- [9] *Main Catalog Cutting Tool SECO JABRO 2012*, halaman 103,107, dan 116.
- [10] Cutting data Corrax, halaman 1
- [11] DORMER MILLING NOMENCALTURE, halaman 1, 103 – 104
- [12] King Fahd University of Petroleum and Materials.” Cutting Tool Materials, hand out 10”
- [13] Kiswanto, Gandjar . “Slide Materi Kuliah CAD / CAM halaman 178, 187, dan 200”. Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

- [14] Gasparraj, Edwin. Fithian Tim. *Non cutting – moves, Frequently Asked Question & Change since NX 5.0*. 7 maret 2012
- [15] http://www.icam.com/html/products/whatis/what_is_post.php diunduh 8:00 AM 2/6/2012
- [16] Buku katalog Nakanishi motor & spindle, micro – grinders.
- [17] *Suruga Seigi Catalogue, 2009 – 2012*. Halaman 32,72,78
- [18] Buku katalog *cutting tool* “Innova tool” . halaman 20
- [19] http://ns-tool_co_ltd.com. Di unduh 7:00 AM; 1/6/ 2012
- [20] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Duraluminium> di unduh 7:00 AM; 1/6/ 2012
- [21] Sumaraw, Elvis A. “ Pengaruh Perlakuan Panas Normalisasi Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Permukaan Silinder Baja St 41 Dibubut dengan Pahat yang Berbeda”.
- [22] <http://google.com> di unduh 7:00 AM; 1/6/ 2012
- [23] [<http://www.custompartnet.com/calculator/milling-speed-and-feed> di unduh 7:00 AM; 1/6/ 2012
- [24] Shpitalni, M. Koren, Y. Lo, C C. “ Realtime Curve Interpolation” Computer – Aided Design Volume 11, 1994;0832-07;833.
- [25] *Standart Coating Application Chart, G.W. SCHULTZ TOOL. inc.*

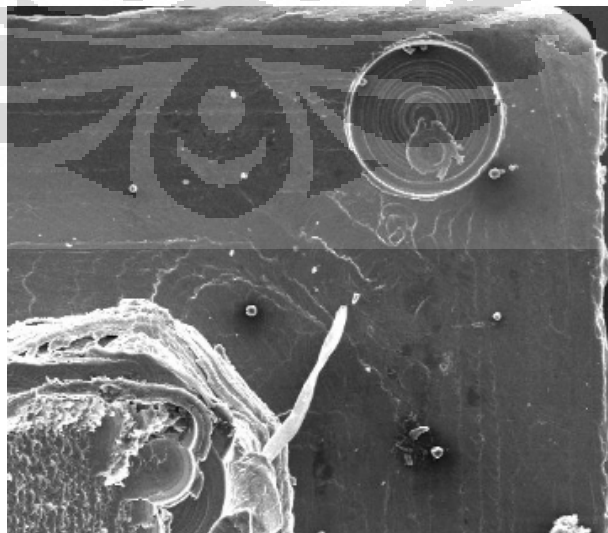
LAMPIRAN

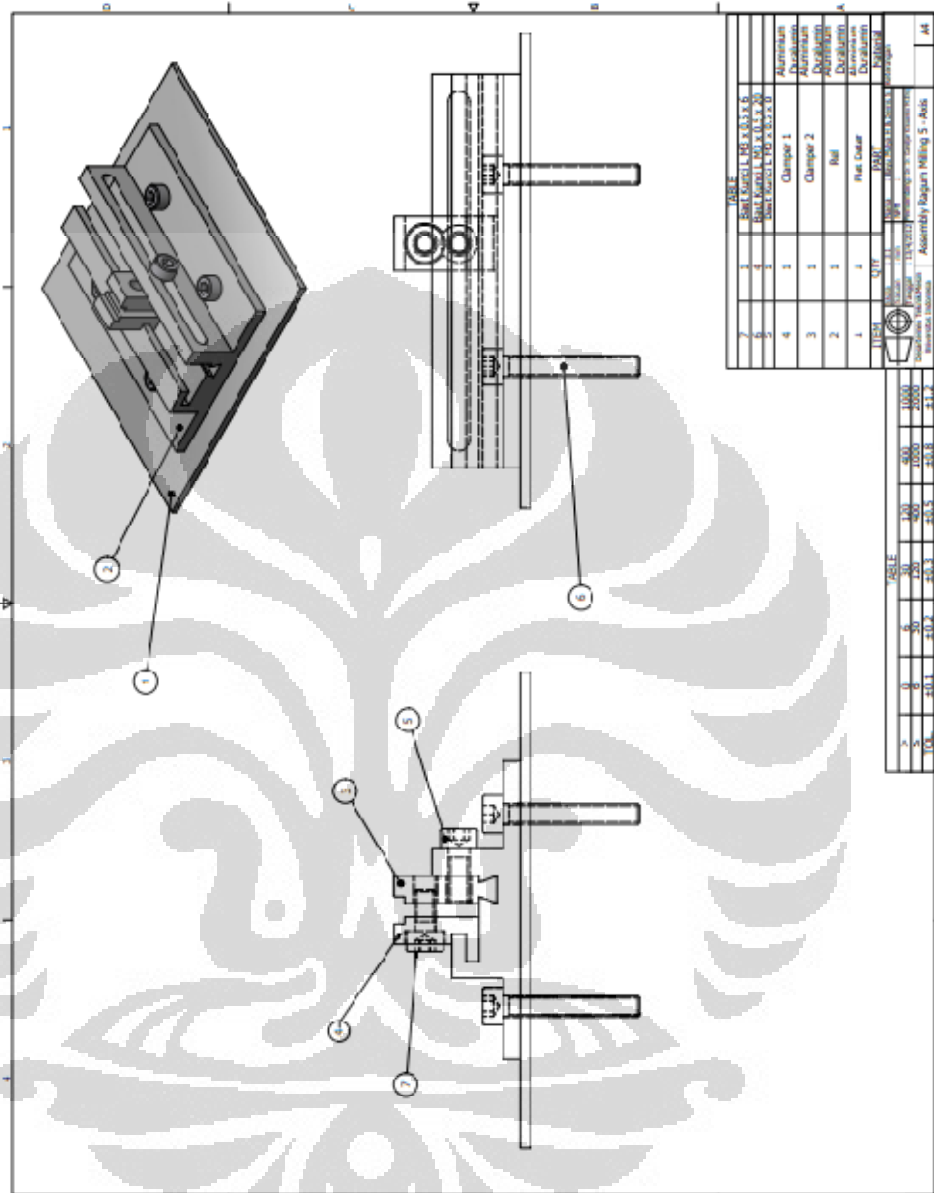
- Foto SEM Hasil Pemesinan lainnya:





- Lokasi penempatan titik *origin cutting tool*.





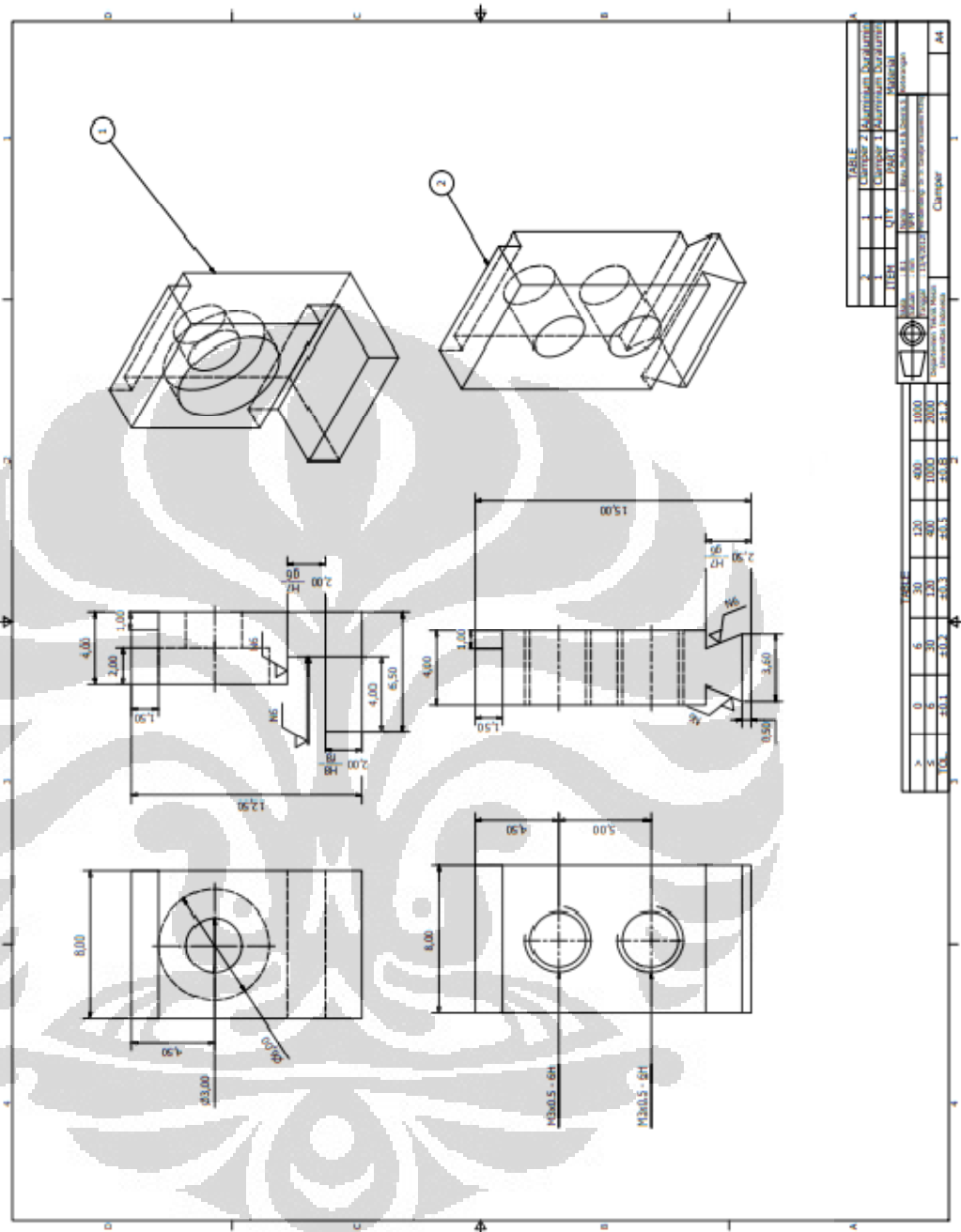


TABLE	
1	Customer 2: Elektronika Dan Rangkaian
2	Customer 1: Praktikum Dasar Rangkaian
3	UJIAN
4	UJIAN
5	UJIAN
6	UJIAN
7	UJIAN
8	UJIAN
9	UJIAN
10	UJIAN
11	UJIAN
12	UJIAN
13	UJIAN
14	UJIAN
15	UJIAN
16	UJIAN
17	UJIAN
18	UJIAN
19	UJIAN
20	UJIAN
21	UJIAN
22	UJIAN
23	UJIAN
24	UJIAN
25	UJIAN
26	UJIAN
27	UJIAN
28	UJIAN
29	UJIAN
30	UJIAN
31	UJIAN
32	UJIAN
33	UJIAN
34	UJIAN
35	UJIAN
36	UJIAN
37	UJIAN
38	UJIAN
39	UJIAN
40	UJIAN
41	UJIAN
42	UJIAN
43	UJIAN
44	UJIAN
45	UJIAN
46	UJIAN
47	UJIAN
48	UJIAN
49	UJIAN
50	UJIAN

TABLE	
1	Customer 2: Elektronika Dan Rangkaian
2	Customer 1: Praktikum Dasar Rangkaian
3	UJIAN
4	UJIAN
5	UJIAN
6	UJIAN
7	UJIAN
8	UJIAN
9	UJIAN
10	UJIAN
11	UJIAN
12	UJIAN
13	UJIAN
14	UJIAN
15	UJIAN
16	UJIAN
17	UJIAN
18	UJIAN
19	UJIAN
20	UJIAN
21	UJIAN
22	UJIAN
23	UJIAN
24	UJIAN
25	UJIAN
26	UJIAN
27	UJIAN
28	UJIAN
29	UJIAN
30	UJIAN
31	UJIAN
32	UJIAN
33	UJIAN
34	UJIAN
35	UJIAN
36	UJIAN
37	UJIAN
38	UJIAN
39	UJIAN
40	UJIAN
41	UJIAN
42	UJIAN
43	UJIAN
44	UJIAN
45	UJIAN
46	UJIAN
47	UJIAN
48	UJIAN
49	UJIAN
50	UJIAN

