



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN DAN ANALISA HASIL LINTASAN PAHAT
PROSES *ROUGHING* PADA PEMESINAN “*MICRO MOLD*”**

SKRIPSI

**DERRIS SURYA
NPM 0806454714**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
Juli 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN DAN ANALISA HASIL LINTASAN PAHAT
PROSES *ROUGHING* PADA PEMESINAN “*MICRO MOLD*”**

SKRIPSI

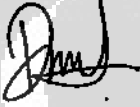
Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**DERRIS SURYA
NPM 0806454714**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
Juli 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Derris Surya
NPM : 0806454714
Tanda Tangan : 
Tanggal : 2 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Derris Surya
NPM : 0806454714
Program Studi : Teknik Mesin
Judul skripsi : Pengembangan dan Analisa Hasil Lintasan
Pahat Proses *Roughing* pada 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 P. 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 Tuhan Yesus Kristus yang telah memberikan hikmat dan berkatnya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulis juga mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah dan Ibu di rumah yang selalu menjadi sumber semangat, motivasi dan inspirasi atas dukungan penuhnya bagi penulis dalam pengerjaan skripsi dan penelitian ini.
2. Dr. Ir. Gandjar Kiswanto M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran, motivasi dan inspirasi untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
3. Prof. Dr. Ir. Tresna P. Soemardi , Dr. Ario Sunar Baskoro S.T., M.T., M.Eng, Dr. Jos Istiyanto S.T., M.T, dan Dr. Yudan Whulanza S.T., M.Sc sebagai penguji sidang skripsi.
4. Saudara kandung penulis; Dennis, Davies, dan Devan yang telah memberikan semangat dan dukungan juga menjadi motivasi bagi penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan skripsi.
5. Bayu Mulya Harsono sebagai partner dalam pengerjaan skripsi dan teman-teman keluarga besar Lab Manufaktur dan otomasi Lt 2 Teguh Santoso, Jediel Billy R., Adnan Afif Alaudin, Ferdian Harjono, M. Gani Maulana, Riandhika Yudhi, Achmad H, Yogi Adrian, dan Agus Siswanta yang telah membantu dan menemani penulis selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan buku skripsi ini.
6. Kepada Ibu Dede Lia yang telah membantu penulis untuk pembuatan *post processor* dan pengerjaan pemesinan *micromilling*.

7. Saripudin, teman mahasiswa Teknik Elektro 2009 yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan program *interface post processor*.
8. Ko andrian, ci Frida, ko Hendra, ka Santo, Marschel, Sisca, Teddy, Holong, Leo, Meyer, Glenn, ko Erhan, dan segenap keluarga besar GO Bogor yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas dukungan dan doanya yang senantiasa memberikan kekuatan dan menemani penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
9. Teman-teman Departemen Teknik Mesin 2008 lainnya dan pihak-pihak yang mendukung yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Akhir kata, semoga berkatNya, kasih karuniaNya, dan damai sejahteraNya yang melimpah-limpah terus menaungi semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga hasil penelitian ini dapat membawa manfaat untuk perkembangan bidang keilmuan yang digunakan dalam penelitian ini.

Depok, 16 Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Derris Surya
NPM : 0806454714
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

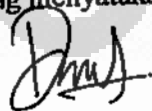
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

“Pengembangan dan Analisa Hasil Lintasan Pahat Proses *Roughing* pada Pemesinan “*Micro-Mold*” “

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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



(Derris Surya)

ABSTRAK

Nama : Derris Surya
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengembangan dan Analisa Hasil Lintasan Pahat Proses *Roughing* pada Pemesinan “*Micro-Mold*”

Permintaan akan produk-produk mikro yang sedang meningkat pesat dewasa ini menyebabkan proses manufaktur cetakan mikro mendapat perhatian dan penekanan lebih, guna mendapatkan pemahaman yang semakin mendalam untuk mencapai hasil akhir produk mikro yang semakin berkualitas [1-4]. Proses *micro-milling* merupakan proses yang populer dalam memanufaktur cetakan mikro karena kapabilitas dan fleksibilitas yang dimilikinya terkait proses pelepasan *material* terhadap benda kerja [1-3,5-7]. Proses manufaktur cetakan mikro dengan material *steel* ST41 dan aluminium AA 1100 berukuran 3 x 3 x 3 mm yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan proses pemesinan *milling* 3 axis terhadap kontur *sculptured surface* dan logo android dengan *cutting tool* berdiameter 0.1 mm sampai ukuran 2 mm.

Lintasan pahat yang dibuat telah menghasilkan permukaan produk dengan profil yang dikehendaki. Dilakukan pengambilan gambar SEM pada hasil pemesinan cetakan mikro ini, serta dilakukan analisis mengenai dua pola lintasan pahat yang dibuat dengan menggunakan *software* CAM untuk operasi *roughing* yang dikerjakan yaitu metode *face milling (planar)* dan *cavity milling (contour)* yang hasilnya menunjukkan bahwa metode *cavity mill* memerlukan *machining time* yang lebih singkat. Analisis dari perbandingan jumlah *CL point* yang terdapat pada bagian lintasan pahat yang serupa antara produk makro dan produk mikro juga dilakukan dan didapatkan bahwa densitas *CL point* pada lintasan pahat produk makro lebih besar dibandingkan yang dimiliki lintasan pahat produk mikro.

Kata kunci:

Cetakan mikro, *micro milling*, pola lintasan pahat, operasi *roughing*

ABSTRACT

Name : Derris Surya
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Roughing Tool Path Development and Analysis of Micro Mold Machining

The increasing demand of micro products these days causes the manufacturing process of micro-molds gets more emphasis and attention in order to gain better quality of micro-products [1-4]. The micro milling process is popular as the chosen method to manufacture micro molds due to its capability and flexibility in machining operation [1-3,5-7]. In this research, the manufacturing processes of micro molds of 3 mm x 3 mm x 3 mm from steel ST41 and aluminium AA 1100 were carried out using 3 axis micro milling utilizes various cutting tools from 2 mm diameter to 0.1 mm of diameter. The designed tool path successfully produced the specified profile of the machined surface.

SEM photographs were taken to observe the machined surface and an analysis of two tool path generation methods of face milling area (planar) and cavity mill (contour) using CAM software was conducted and shorter cutting time for the cavity milling method was found as the result. Analysis of CL point density comparison between the micro molds and macro molds roughing tool path in the same region was also done with the comparable applied cutting parameters and the result shows that the macro mold roughing tool path has denser CL point than the other of the micro mold's.

Keywords:

Micro mold, micro milling, tool path pattern, roughing process

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Permasalahan	4
1.3. Tujuan dan Hipotesis Penelitian.....	4
1.4. Batasan Penelitian.....	4
1.5. Metodologi Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB 2 OPERASI <i>MICRO-MILLING</i> DALAM PROSES MANUFAKTUR	
CETAKAN MIKRO	7
2.1. Cetakan mikro (<i>Micromold</i>)	7
2.2. <i>Micro-milling</i>	8
2.3. Proses manufaktur memanfaatkan sistem CAD/CAM.....	16
BAB 3 PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO	24
3.1. Desain CAD.....	25
a. Cetakan <i>sculptured surface male</i> dan <i>female mold</i>	25
b. Logo android <i>male</i> dan <i>female</i>	27

3.2.	CAM <i>programming</i> dan CL-File <i>generation</i>	28
3.2.1.	Proses pengerjaan lintasan pahat model-model lainnya dengan CAM <i>system</i>	39
3.3.	NC-File <i>Generation</i> dan proses pemesinan <i>micro-milling</i>	50
1.2.1.	NC-File <i>Generation</i>	50
1.2.2.	CNC <i>Machinetool</i>	52
BAB 4 ANALISA PROSES DAN HASIL DALAM PEMESINAN		
	MICROMOLD	60
4.1	Kesesuaian hasil pemesinan dengan profil permukaan desain	60
4.2	Kualitas permukaan dan <i>burr formation</i> atau <i>uncut chip</i> yang terbentuk.....	63
4.3	<i>Tool life</i>	74
BAB 5 ANALISIS LINTASAN PAHAT OPERASI ROUGHING		
5.1	Perbandingan operasi <i>roughing</i> metode <i>face milling area</i> dengan <i>cavity mill</i>	80
5.2	Perbandingan operasi <i>roughing face milling area</i> terhadap <i>micro-mold</i> dan <i>macro-mold</i>	86
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT		
6.1	Kesimpulan.....	90
6.2	Saran Penelitian lebih lanjut	90
	REFERENSI	91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Material polimer untuk proses <i>injection molding</i>	9
Tabel 3.1 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Roughing</i>	31
Tabel 3.2 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Z-Level Roughing</i>	32
Tabel 3.3 <i>Speed Factor</i>	32
Tabel 3.4 <i>Speed Factor</i>	32
Tabel 3.5 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Semi finishing</i>	35
Tabel 3.6 <i>Speed Factor</i>	35
Tabel 3.7 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Finishing</i>	37
Tabel 3.8 <i>Speed Factor</i>	37
Tabel 3.9 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Cavity mill Roughing</i>	39
Tabel 3.10 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>ContourArea Semi finishing</i>	40
Tabel 3.11 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Finishing</i>	41
Tabel 3.12 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Roughing</i>	42
Tabel 3.13 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Roughing</i> (<i>profiling</i>)	43
Tabel 3.14 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Finishing</i>	43
Tabel 3.15 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Finish</i> (<i>Deburring</i>)	44
Tabel 3.16 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Cavity mill Roughing</i> (<i>badan</i>)	45
Tabel 3.17 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Rest milling Semi finishing</i> (<i>badan</i>)	46
Tabel 3.18 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Cavity mill Roughing</i> (<i>kepala</i>)	46
Tabel 3.19 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Rest milling Semi finishing</i> (<i>kepala</i>).....	47
Tabel 3.20 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Rest milling Roughing</i> (<i>tangan</i>)	48
Tabel 3.21 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Finishing</i> (<i>seluruh bagian</i>).....	49
Tabel 3.22 <i>Cutting Parameter</i> rekomendasi	56
Tabel 4.1 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Face milling area Roughing</i>	68
Tabel 4.2 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Rest milling Roughing</i>	68
Tabel 4.3 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Semi finishing</i>	70
Tabel 4.4 <i>Cutting parameter</i> pada operasi <i>Contour area Finishing</i>	72
Tabel 4.5 <i>Machining Time</i>	74
Tabel 5.1 Parameter Perbandingan dua Metode Proses <i>Roughing</i>	86
Tabel 5.2 Parameter Perbandingan Sampel Makro dan Sampel Mikro	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mesin <i>injection molding</i>	8
Gambar 2.2 Prinsip pengerjaan proses <i>milling</i>	10
Gambar 2.3 Proses <i>upmilling</i> dan <i>downmilling</i>	11
Gambar 2.4 <i>Slab, slotting, side, dan straddle milling</i>	11
Gambar 2.5 <i>Face(a), partial face (b), end (c), profile (d), pocket (e) dan contour (f) milling</i>	11
Gambar 2.6 <i>Feed per tooth</i>	13
Gambar 2.7 Visualisasi parameter pemesinan.....	13
Gambar 2.8 Jenis-jenis pahat.....	14
Gambar 2.9 Spesifikasi bagian <i>cutting tool</i>	15
Gambar 2.10 Contoh lintasan pahat.....	18
Gambar 2.11 <i>Cutter contact</i> dan <i>cutter location point</i>	19
Gambar 2.12 Contoh pola lintasan pahat <i>parallel</i>	20
Gambar 2.13 Contoh pola lintasan pahat spiral.....	20
Gambar 2.14 <i>Tolerance band</i>	21
Gambar 2.15 Contoh kejadian <i>collision</i>	22
Gambar 2.16 Warna penanda segmen-segmen <i>tool path</i>	23
Gambar 3.1 Alur kerja proses manufaktur dengan mesin CNC lewat CAD/CAM.....	24
Gambar 3.2 <i>Sculptured surface male mold</i>	26
Gambar 3.3 <i>Sculptured surface female mold</i>	26
Gambar 3.4 Model logo android <i>male mold</i>	27
Gambar 3.5 Model logo android <i>female mold</i>	27
Gambar 3.6 Alur <i>CAM programming</i>	30
Gambar 3.7 <i>Roughing cut pattern</i> (simplifikasi dan aktual).....	33
Gambar 3.8 <i>Z-level profile tool path</i>	33
Gambar 3.9 <i>Semi finishing tool path</i> (aktual dan simplifikasi).....	36
Gambar 3.10 <i>Finishing tool path</i> (aktual dan simplifikasi).....	38
Gambar 3.11 Parameter pemesinan rekomendasi dari perusahaan pembuat pahat.....	39
Gambar 3.12 <i>Roughing tool path</i>	40
Gambar 3.13 <i>Semi-finishing tool path</i>	41
Gambar 3.14 <i>Finishing tool path</i>	41
Gambar 3.15 <i>Roughing tool path</i>	42
Gambar 3.16 <i>Profiling tool path</i>	43
Gambar 3.17 <i>Face cleaning tool path</i>	44
Gambar 3.18 <i>Deburring tool path</i>	45

Gambar 3.19 <i>Roughing</i> bagian badan	45
Gambar 3.20 <i>Rest milling</i> bagian badan (simplifikasi dan aktual)	46
Gambar 3.21 <i>Roughing tool path</i> bagian kepala (simplifikasi)	47
Gambar 3.22 <i>Roughing tool path</i> bagian kepala (aktual)	47
Gambar 3.23 <i>Rest milltool path</i> bagian kepala (simplifikasi).....	48
Gambar 3.24 <i>Rest mill tool path</i> bagian kepala (aktual).....	48
Gambar 3.25 <i>Rest mill tool path</i> bagian tangan (simplifikasi)	49
Gambar 3.26 <i>Rest mill tool path</i> bagian tangan (aktual).....	49
Gambar 3.27 <i>Tool path finishing</i> seluruh bagian (simplifikasi dan aktual).....	50
Gambar 3.28 Contoh <i>CL-File</i>	51
Gambar 3.29 Contoh <i>NC-File</i>	51
Gambar 3.30 Alur kerja kontrol motor penggerak.....	52
Gambar 3.31 Alur kerja penggerak <i>spindle</i>	54
Gambar 3.32 Grafik karakteristik <i>spindle</i>	55
Gambar 3.33 <i>Motorized stages</i>	57
Gambar 3.34 <i>Collet cutting tool</i>	57
Gambar 3.35 Alur terjadinya <i>error</i> akibat <i>z-level cutting tool</i> yang berubah- ubah.....	58
Gambar 4.1 Geometri hasil pemesinan <i>sculptured surface male</i>	61
Gambar 4.2 Geometri hasil pemesinan <i>sculptured surface female</i>	62
Gambar 4.3 Geometri hasil pemesinan logo android <i>male</i>	62
Gambar 4.4 Geometri hasil pemesinan logo androi <i>female</i>	63
Gambar 4.5 <i>Sculptured surface</i>	64
Gambar 4.6 Geometrii hasil pemesinan <i>male sculptured surface</i>	64
Gambar 4.7 Geometrii hasil pemesinan <i>male sculptured surface</i>	65
Gambar 4.8 <i>Burr</i> yang terjadi pada daerah puncak-lembah	65
Gambar 4.9 <i>Burr</i> yang terjadi pada daerah puncak-lembah	66
Gambar 4.10 Lokasi penentuan titik <i>origin</i>	67
Gambar 4.11 <i>Tool path</i> operasi <i>roughing</i> I.....	68
Gambar 4.12 <i>Tool path Rest milling</i> simplifikasi	69
Gambar 4.13 <i>Tool path Rest milling</i> aktual	69
Gambar 4.14 Sisa material operasi <i>roughing</i> I & II.....	69
Gambar 4.15 <i>Tool path contour area semi finishing</i> aktual.....	70
Gambar 4.16 Geometri hasil pemesinan <i>semi finishing</i> dengan pahat 0.2 mm <i>flat end mill</i> pada <i>software</i>	71
Gambar 4.17 Geometri hasil pemesinan <i>semi finishing</i> dengan pahat 0.2 mm <i>flat end mill</i> secara aktual	71
Gambar 4.18 <i>Tool path contour area finishing</i> aktual.....	72

Gambar 4.19 Sisa material <i>finishing software</i>	73
Gambar 4.20 Sisa material <i>finishing</i> aktual	73
Gambar 4.21 <i>Cutting tool</i> 0.1 mm kondisi baru	75
Gambar 4.22 <i>Cutting tool</i> 0.5 mm setelah pemakaian	76
Gambar 4.23 <i>Cutting tool</i> 0.2 mm setelah pemakaian	76
Gambar 4.24 <i>Cutting tool</i> 0.1 mm <i>ball nose</i> setelah 16 jam pemakaian	77
Gambar 4.25 <i>Cutting tool</i> 0.1 mm <i>ball nose</i> setelah 32 jam pemakaian	77
Gambar 5.1 Arah lintasan pahat proses <i>roughing face milling area</i> (simplifikasi)	82
Gambar 5.2 Lintasan pahat proses <i>roughing face milling area</i> (aktual).....	82
Gambar 5.3 Arah lintasan pahat proses <i>roughing cavity mill</i> (simplifikasi).....	83
Gambar 5.4 Lintasan pahat proses <i>roughing cavity mill</i> (aktual)	83
Gambar 5.5 Geometri hasil pemesinan <i>roughing face milling area</i>	84
Gambar 5.6 Geometri hasil pemesinan <i>cavity milling</i>	84
Gambar 5.7 Geometri hasil pemesinan <i>roughing z-milling area</i>	85
Gambar 5.8 Geometri hasil pemesinan <i>roughing z-milling area</i>	85
Gambar 5.9 Dimensi sampel skala makro.....	87
Gambar 5.10 Dimensi sampel skala mikro	87
Gambar 5.11 Bagian lintasan pahat yang diamati.....	88

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan teknologi di hampir semua bidang ilmu sepakat di satu hal yang sama: “compactness”. Dengan luas *area* atau *volume* seminimal mungkin, sebuah produk harus bisa mendapatkan performa yang lebih baik dari pada produk serupa yang konvensional. *Down-scaling* yang dilakukan tidak hanya mengecilkan ukuran produk, namun juga menambah nilainya dengan menyisipkan fitur-fitur multifungsi [8]. Hal tersebut merupakan *trend* yang terjadi dewasa ini yang juga sepaham dengan pandangan bahwa dengan membuat segala sesuatunya lebih ringkas dan lebih kecil, akan membuat sebuah produk menjadi lebih praktis, lebih ringan dan lebih *portable*. Perkembangan teknologi sekarang berorientasi menuju teknologi mikro, bahkan teknologi nano. Tingkat mobilitas dan komunikasi manusia di era informasi sekarang ini menjadi salah satu penyebab meningkatnya kebutuhan manusia akan teknologi/produk yang serba berukuran kecil. Salah satu contoh dari fenomena tersebut adalah teknologi komputer. Dewasa ini komponen-komponen komputer, salah satunya adalah *resistor*, menjadi berukuran sangat kecil agar mendapatkan performa yang makin baik walaupun dengan tempat yang sangat terbatas. Sehingga evolusi komputer dari ukuran yang super besar bisa menjadi gadget yang super ringkas dan bahkan bisa terenggam oleh tangan kita.

Permintaan akan produk-produk ukuran mikro meningkat secara signifikan hari demi hari [3,5,9]. Persaingan pasar atau industri yang semakin kompetitif berbanding lurus dengan kemajuan teknologi. Oleh karena itu, untuk menjadi pemenang atau bertahan dan berkembang sebagai pelaku pasar dalam kompetisi tersebut, berjalan beriringan dengan kemajuan teknologi adalah kunci utamanya. Tak bisa dihindari, menguasai teknologi mikro telah menjadi suatu kebutuhan yang penting dan akan menjadi semakin mendesak bagi para pelaku pasar, khususnya bagi penggerak industri manufaktur. Sekarang sudah dapat kita jumpai banyak produk-produk mikro di berbagai bidang yang mana menjadi indikasi

perkembangan teknologi mikro; di bidang kedokteran kita jumpai berbagai alat berukuran skala mikro seperti alat bantu dengar, komponen ujung kateter, *dental prosthetics* dan alat monitoring pembuluh darah, kemudian di bidang telekomunikasi kita jumpai konektor optik fiber, dan juga rumah optik fiber, sementara itu di bidang mekanikal terdapat *gear* mikro, motor mikro atau turbin mikro, lalu di bidang elektronik kita bisa temui rumah sensor mikro, *gear potentiometer* dan *sensor airbag*, juga di bidang teknologi komputer dengan dijumpainya konektor mikro, kepala tinta printer, alat penukar panas mikro, dan lain-lain [2,3,8].

Sementara itu, di sisi lain, dalam dunia akademik atau ilmu pengetahuan, para ilmuwan telah mencapai banyak kemajuan dalam teknologi mikro ini [1-6,8,10]. Para peneliti tersebut sedang melakukan penelitian-penelitian lebih jauh karena masih banyak hal yang belum sepenuhnya dipahami, oleh karena itu, masih banyak ruang untuk berkembang bagi setiap penelitian yang fokus untuk teknologi mikro ini. Setiap eksperimen yang dilakukan yang terkait dengan teknologi mikro selalu memberikan kontribusi yang berarti bagi kemajuan teknologi ini, bahkan setiap kesalahan yang terjadi pun menjadi pembelajaran yang berharga bagi penelitian bidang teknologi mikro ini secara keseluruhan. Pentingnya penelitian di bidang ini sudah sangat disadari oleh para praktisi, sehingga investasi yang dilakukan untuk penelitian ini juga bukan jumlah yang kecil, dan hal itu menunjukkan bahwa dunia memang sedang sepakat mengarah ke arah yang sama.

Untuk mencapai tingkat *compactness* yang diinginkan, tentunya diperlukan teknologi yang mumpuni untuk mengerjakan dan memmanufaktur komponen-komponen tersebut. Sejauh ini, ukuran skala mikro sudah mulai dikuasai oleh kemajuan teknologi manusia, bahkan secara perlahan teknologi nano sudah mulai tersentuh dan berkembang. Ukuran skala mikro biasanya didefinisikan dengan ukuran maksimal 100 μm , sedangkan teknologi nano maksimal berukuran 100 nm. Produk-produk mikro yang sering dijumpai biasanya masih sangat terbatas spesifikasinya, khususnya dalam hal materialnya. Selain itu, geometri yang dibutuhkan untuk masing-masing produk di setiap bidang tentunya sangat beragam, dari bentuk-bentuk yang simpel dan sederhana sampai kepada geometri-

geometri dan *profile-profile* yang kompleks dengan tingkat kesulitan pembuatan yang tinggi seperti yang dijumpai pada *sculptured surface*. *Sculptured surface* makin banyak digunakan untuk keperluan di berbagai aplikasi seperti dalam bidang *aerodynamic* untuk pembuatan *air foil (jet engine)*, *impeller* (kompresor), *marine propeller*; pada bidang *optical* seperti yang ditemukan pada *lamp reflector (automobile)*, *shadow mask (TV-monitor)*, *radar-dish*; untuk industri *sport equipments* dan *toy-making industries*; di bidang medis untuk *part-part* untuk *anatomical reproduction*; dan juga di bidang *manufacturing* untuk pembuatan *parting surface (moulding die)*, *die face (stamping die)* dan lain-lain salah satunya adalah karena *sculptured surface* memiliki segi estetika yang lebih disukai oleh konsumen, khususnya untuk bidang *automotive* dan *electronics* [11]. Namun pada kenyataannya, proses manufaktur yang bisa diandalkan untuk mengerjakan produk-produk mikro tersebut sangatlah terbatas, baik dalam hal ukuran maupun tingkat kompleksitas yang mampu dikerjakan. Teknologi *molding* adalah salah satu teknologi yang mempunyai keunggulan dalam mengerjakan produk-produk dengan *profile* yang rumit, teknologi ini pun sudah cukup populer dan favorit dalam memmanufaktur produk-produk mikro. Teknologi *injection molding* secara lebih spesifik adalah proses manufaktur yang sangat sesuai untuk pengerjaan produk-produk mikro [1]. Oleh karena itu, diperlukan cetakan (*mold*) berukuran mikro untuk menghasilkan produk-produk mikro lewat proses *injection molding* tersebut. Lagipula, kebanyakan produk mikro sekarang ini dibuat dengan menggunakan *material polymer* atau sejenisnya, selain karena teknologi telah membuat *engineering plastics* yang mana mempunyai sifat-sifat yang super dibandingkan *polymer* biasa, sifat atau *properties* dasar dari *material polymer* yang mudah dibentuk, titik leleh dan titik solidifikasinya yang juga rendah menjadi kelebihan tersendiri. Hal tersebut mendorong teknologi proses *molding* atau cetakan menjadi sangat cocok dalam proses manufaktur produk mikro. Pembuatan produk mikro dengan teknologi *molding* memiliki banyak kesamaan dengan proses *molding* skala makro, tentunya aspek ukuran adalah perbedaan yang mendasar. Proses manufaktur cetakan mikro (*micromolds*) menjadi salah satu tantangan yang serius dan menantang dalam perkembangan teknologi mikro selanjutnya.

Proses manufaktur cetakan mikro tersebut dapat dilakukan oleh beberapa proses *non-conventional machining* seperti EDM (*Electro Discharge machining*), *lithography*, dan *micromilling* [3]. Proses-proses tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Namun, dengan berbagai kelebihannya dan kapabilitas pemesinan yang luas, proses *micromilling* merupakan salah satu proses yang banyak dijumpai dalam perkembangan teknologi mikro [3]. Geometri-geometri yang diperlukan dalam pembuatan *micromold* dapat dikerjakan dengan baik oleh proses *micromilling* ini. Dalam proses *machining*, terdapat tahapan-tahapan awal yang diperlukan sebelum proses pemesinan dimulai. Pemodelan geometri 3D di sistem CAD, perancangan *tool path* (jalur mata pahat), pemodelan parameter pemesinan, dan visualisasi proses pemesinan, pembuatan CL-File dalam sistem CAM, sampai tahap *post processor* dan akhirnya proses pemesinan [12]. Proses manufaktur *micromold* ini dari tahap awal sampai menjadi produk jadi adalah satu rangkaian yang menantang dan menarik untuk dipelajari dan diteliti lebih lanjut lagi.

1.2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan paparan di atas maka permasalahan yang dapat diambil yaitu :

- a. Proses manufaktur cetakan mikro (*micromold*) dari pemodelan sampai pada produk jadi dengan menggunakan teknologi *micromilling*.
- b. Kualitas permukaan dan kesesuaian geometri dari hasil pemesinan *micromilling*.
- c. Kapabilitas *software* CAM dalam mengerjakan lintasan pahat dalam skala mikro.
- d. Pola lintasan pahat yang efektif untuk proses *roughing*.
- e. Komparasi lintasan pahat skala makro dengan skala mikro.

1.3. Tujuan dan Hipotesis Penelitian

Tujuan penelitian adalah mempelajari proses manufaktur dari *micro-mold*. Kemudian juga untuk meneliti dan mempelajari komparasi lintasan pahat operasi *roughing* dari proses pemesinan *milling micro-mold* tersebut, juga perbandingannya pada cetakan mikro dengan lintasan pahat skala makro. Selain

itu, pengamatan terhadap kualitas hasil pemesinan cetakan mikro juga menjadi satu perhatian khusus pada penelitian kali ini.

1.4. Batasan Penelitian

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

- a) Proses manufaktur cetakan mikro (*micromold*) dengan menggunakan teknologi *micromilling*.
- b) Parameter-parameter pemesinan *micromilling*.
- c) Perancangan jalur mata pahat (*tool path*).
- d) Analisa kualitas hasil pemesinan *micromilling*.
- e) Pengamatan dan analisis pola lintasan pahat *roughing*.
- f) Komparasi lintasan pahat operasi *roughing* skala makro terhadap skala mikro.

1.5. Metodologi Penelitian

Konsultasi dengan dosen pembimbing yang juga sebagai kepala tim riset dan dengan kelompok tim riset, disertai dengan studi literatur. Konsultasi merupakan hal yang penting bagi penulis untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Di dalam setiap konsultasi selalu terjadi *brainstorming* yang berorientasi kepada pembahasan dan perumusan solusi untuk setiap permasalahan yang ditemukan selama penelitian.

Proses manufaktur cetakan mikro yang terdiri dari beberapa tahapan;

- a. Perancangan model 3D
- b. Perancangan jalur mata pahat dan parameter pemesinan
- c. Visualisasi proses pemesinan
- d. Proses pemesinan

1.6. Sistematika Penulisan

Pada penulisan laporan tugas akhir ini, beberapa topik pembahasan adalah sebagai berikut:

BAB 1: Pendahuluan.

Bab ini membahas tentang latar belakang dari penelitian yang dikerjakan, rumusan permasalahan yang akan dibahas, tujuan dari penelitian, batasan dari penelitian, metodologi penelitian, dan juga sistematika penulisan dari laporan.

BAB 2: Operasi *micro-milling* dalam proses manufaktur cetakan mikro.

Bab ini membahas tentang konsep-konsep dasar dan dasar teori dari pembahasan penelitian ini.

BAB 3: Proses manufaktur cetakan mikro.

Bab ini menceritakan tahapan-tahapan pengerjaan sampel *micro-mold* yang dikerjakan, spesifikasi mesin, dan peralatan yang digunakan dalam penelitian.

BAB 4: Analisis hasil-hasil pemesinan cetakan mikro.

Bab ini menjelaskan hasil pemesinan sampel, berdasarkan kesesuaian geometri, *burr* atau *uncut chip* yang terbentuk, *dantool wear* yang terjadi.

BAB 5: Fokus penelitian: Analisa lintasan pahat *roughing* .

Bab ini menjelaskan tentang analisis dari pola lintasan pahat pada operasi *roughing* proses manufaktur cetakan mikro.

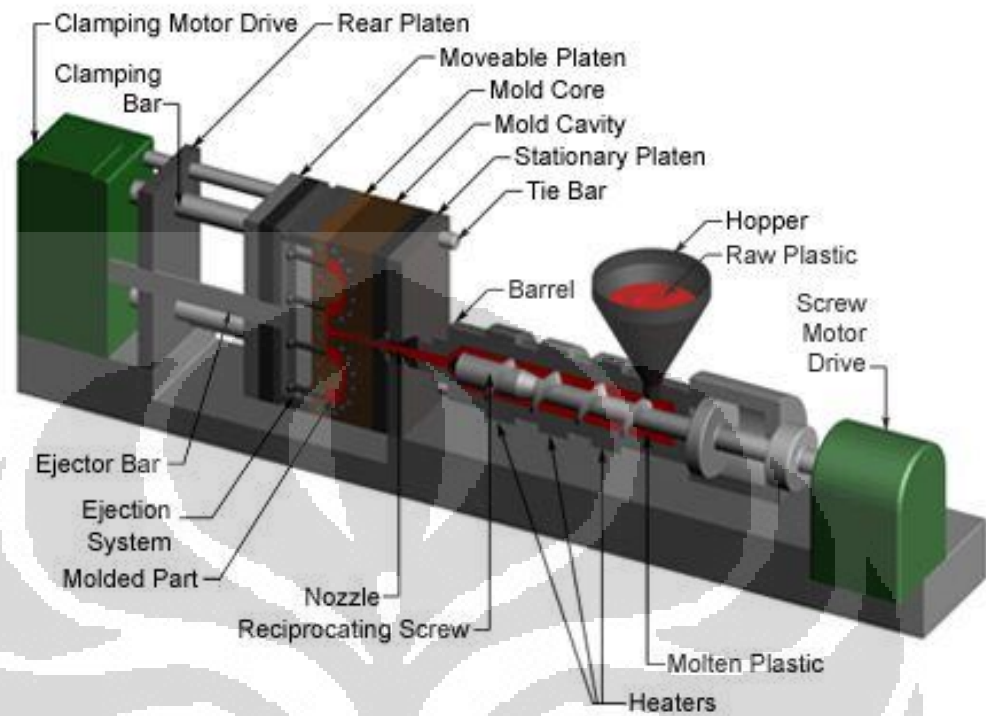
BAB 2

OPERASI *MICRO-MILLING* DALAM PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO

2.1. Cetakan mikro (*Micromold*)

Micro injection molding adalah salah satu proses *molding* yang populer digunakan dalam membuat produk-produk mikro karena kapabilitasnya dalam memproses lelehan *material* dasar menjadi produk yang diinginkan dengan memanfaatkan bentuk geometri (*cavity and core*) cetakan sesuai geometri produk yang diinginkan [1]. Salah satu keuntungan penggunaan proses ini adalah produk atau *part* hasil yang dikerjakan dapat mencapai spesifikasi toleransi yang mendekati spesifikasi toleransi akhir (*close tolerance-net shape*) [13]. Proses *micro injection molding* tidak mengalami banyak perubahan parameter selain ukuran dibandingkan proses makronya. Prinsip dasar proses *injection molding* meliputi pemanasan *material* (biasanya *material* termoplastik) sampai meleleh, lalu mendorong lelehan *material* tersebut ke dalam cetakan besi (*steel mold*) sampai lelehan mengalami proses pendinginan dan akhirnya perlahan kembali memadat [14].

Dengan begitu, maka cetakan mikro (*micromold*) merupakan sarana yang sangat penting dalam proses *injection molding* ini. Geometri cetakan menentukan bentuk produk yang dikerjakan. Oleh karena itu proses pembuatan cetakannya menjadi sangat penting agar mendapat kualitas produk yang baik. Pembuatan cetakan menjadi berlipatganda tingkat kesulitannya saat topik bahasannya adalah mengenai cetakan mikro. Skala yang begitu kecil menjadikan pencapaian kualitas permukaan akhir dari cetakan mikro menjadi sangat sensitif dan rawan, lagi memerlukan *effort* yang lebih untuk mencapai kualitas permukaan yang baik. Cetakan mikro yang dimanufaktur termasuk kedalam kategori *multiple use mold* dan *closed mold* [13].



Gambar 2.1 Mesin injection molding [14]

Pembuatan cetakan mikro bisa dilakukan dengan beberapa proses pemesinan *non-konvensional* seperti *micro EDM (Electric Discharge Machining)*, teknik *lithography*, *abrasive jet micro machining*, *ultrasonic micro machining* and *micro-milling*. Namun diantara semuanya itu, proses *micro-milling* merupakan salah satu proses paling handal dan dapat diandalkan dalam proses pemesinan geometri-geometri yang kompleks [introduction to manufacturing process][2].

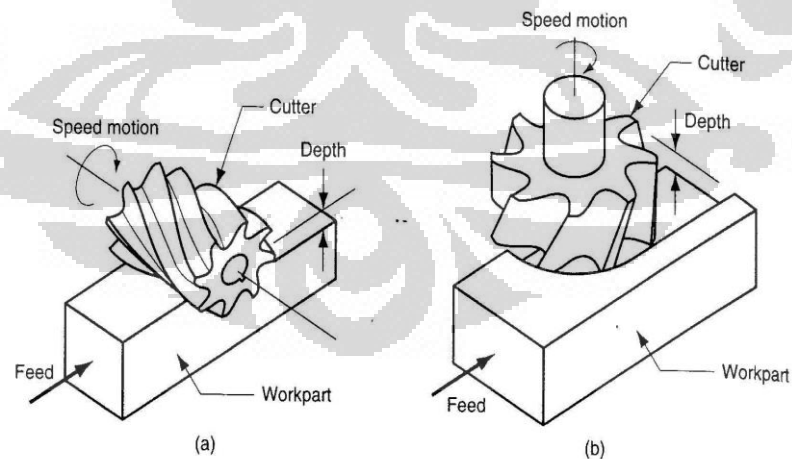
Tabel 2.1 Material polimer untuk *injection molding* [15]

Thermoplastic	Yield strength (MN/m ²)	Elastic modulus (MN/m ²)	Heat deflection temperature (°C)	Cost (\$/kg)
High-density polyethylene	23	925	42	0.90
High-impact polystyrene	20	1900	77	1.12
Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)	41	2100	99	2.93
Acetal (homopolymer)	66	2800	115	3.01
Polyamide (6/6 nylon)	70	2800	93	4.00
Polycarbonate	64	2300	130	4.36
Polycarbonate (30% glass)	90	5500	143	5.54
Modified polyphenylene oxide (PPO)	58	2200	123	2.75
Modified PPO (30% glass)	58	3800	134	4.84
Polypropylene (40% talc)	32	3300	88	1.17
Polyester terephthalate (30% glass)	158	11,000	227	3.74

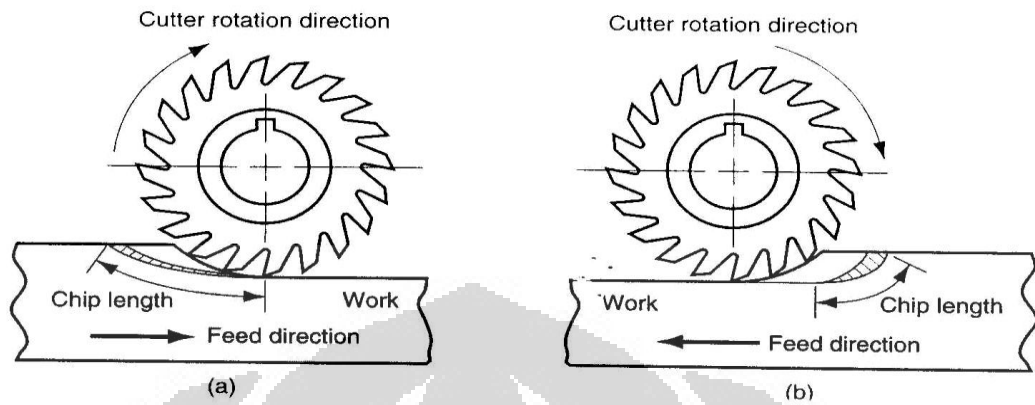
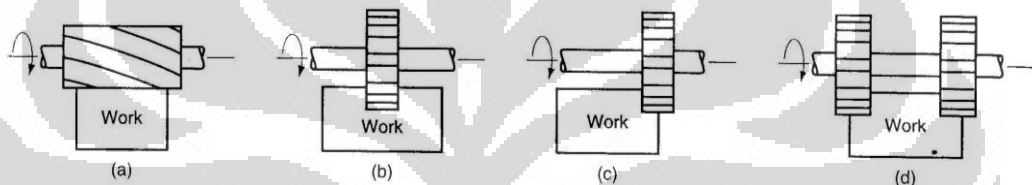
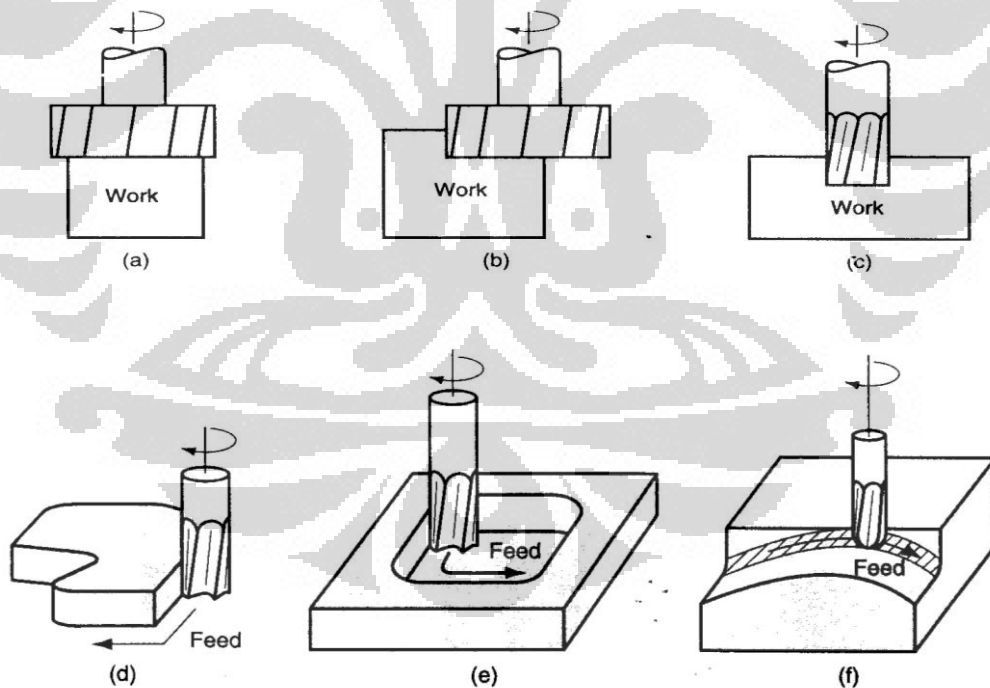
2.2. *Micro-milling*

Proses *micro-milling*, seperti telah disinggung sebelumnya, termasuk kategori proses pemesinan *non-konvensional*. Sekilas, proses *micro-milling* seperti hampir tanpa perbedaan mencolok bila dibandingkan dengan proses *macro-milling* selain daripada ukurannya. Penskalaan ukuran dari dimensi makro menjadi skala mikro sebenarnya mempunyai banyak efek-efek atau dampak-dampak yang tidak bisa diabaikan begitu saja, bahkan faktanya dampak-dampak yang terjadi membuat kebanyakan parameter-parameter yang dilakukan di operasi *macromilling* tidak bisa dikenakan atau diaplikasikan dalam proses *micro-milling* ini.

Proses *micro-milling*, seperti proses *macro-milling* merupakan salah satu proses pemesinan subtraktif *non-konvensional* yang bekerja dengan frame skala mikro. Prinsip dasarnya serupa dengan proses *macro-milling*, yaitu proses pelepasan *material* dengan menggunakan mata pahat yang berputar pada kecepatan *spindle* yang tinggi. Proses pemesinan milling sudah cukup dikenal karena perkembangan teknologinya yang sudah dilakukan lebih dari dua decade silam [6]. Dalam proses *milling*, terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi operasi *milling* secara keseluruhan, parameter-parameter tersebut adalah parameter pemesinan atau *cutting parameter*. Parameter-parameter inilah yang menjadi permasalahan ketika dilakukan penskalaan proses *milling* konvensional. Pengaruh-pengaruh *cutting parameter* yang terjadi dalam proses *milling* konvensional banyak yang berubah ketika operasi diskalakan ke dalam ukuran mikro dan tidak bisa dipertahankan korelasinya dalam pemesinan skala mikro. Pengaruh dan dampak *cutting parameter* ini serta korelasinya dalam proses pemesinan *milling* ini lah yang hampir selalu menjadi perhatian khusus dalam setiap penelitian yang membahas pemesinan mikro [1,10]. Perbedaan perlakuan sudah tentu harus dikenakan jika pengerjaan pemesinan skala mikro mejadi pilihan proses manufaktur yang akan digunakan.



Gambar 2.2 Prinsip pengerjaan proses *milling* [13]

Gambar 2.3 Proses *upmilling* and *downmilling* [13]Gambar 2.4 *Slab, slotting, side, dan straddle milling* [13]Gambar 2.5 *Face (a), partial face (b), end (c), profile (d), pocket (e), dan contour (f) milling* [13]

Parameter-parameter pemesinan yang terpengaruhi oleh penskalaan yang dilakukan saat operasi *micro-milling* adalah sebagai berikut:

a. *Cutting speed, spindle speed dan feed rate*

Cutting speed atau biasa disebut *surface speed* atau *speed* saja adalah kecepatan di arah tangential perputaran dari *cutting tool*. Didefinisikan sebagai kecepatan *material* bergerak terlepas melewati *cutting edge* dari mata pahat.

Spindle speed merupakan kecepatan putar *spindle* dari mata pahat, dalam satuan RPM (*revolution per minute*). Bentuk atau geometri dari *tooth* milik mata pahat membuatnya memerlukan gerakan rotasi agar pemakanan/pemesinan dapat berjalan.

Feed rate merupakan kecepatan pemakanan mata pahat terhadap *workpiece*. Arah komponen *feed rate* adalah menuju ke benda kerja, sehingga terjadi pemakanan/pemesinan benda kerja dan terdapat pelepasan *material*/geram.

Ketiga komponen kecepatan ini secara langsung dan tidak langsung memiliki keterkaitan, dan sangat berpengaruh terhadap proses pemesinan sehingga perlu pemahaman yang baik tentang ketiganya. Dari gambar dapat dilihat keterangan arah dari ketiga komponen kecepatan ini; panah yang melingkar searah *spindle* merupakan *spindle speed*, arah panah tangensial menunjukkan *cutting speed*, dan arah panah yang *linear* menuju *workpiece* merupakan *feed rate*.

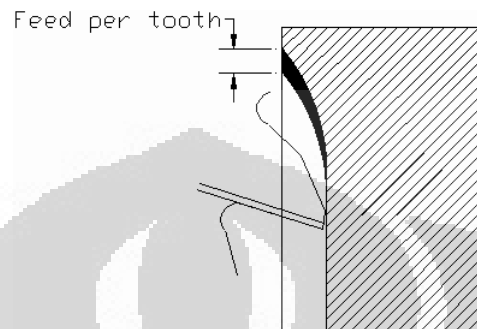
$$CS = spindle\ speed \times \pi \times diameter\ tool\ (mm/min)$$

$$Feed\ rate = Spindle \times Z \times f_z\ (mm/min)$$

b. *Feed per tooth, chip load, depth per cut, dan width per cut.*

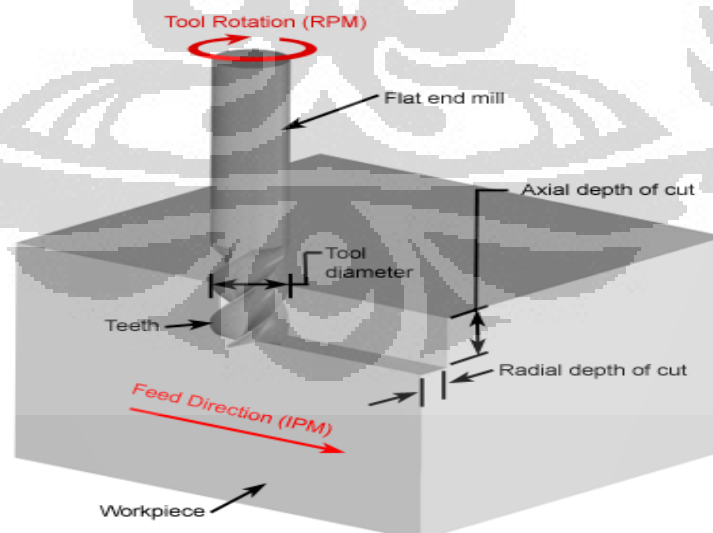
Feed per tooth (f_z) didefinisikan sebagai ketebalan *chip* yang akan dimakan ketika pertama kali *cutting edge* menyentuh/memakan benda kerja. Sedangkan *chip load* merupakan ketebalan dari *chip* yang terlepas/termakan, dan nilainya bervariasi dari nol sampai sama dengan nilai *Feed per tooth*. *Chip* yang terlepas atau termakan seringkali berbentuk seperti sabit, oleh karena itu nilai dari *chip*

load yang bervariasi/berubah-ubah sepanjang busur dari sabit tersebut tidak bisa disamakan dengan nilai *Feed per tooth*.



Gambar 2.6 *Feed per tooth* [16]

Depth per cut atau seringkali disebut *axial depth per cut* merupakan nilai kedalaman makan mata pahat (didefinisikan sebagai seberapa dalam mata pahat melakukan pemesinan terhadap benda kerja). Nilainya biasanya konstan untuk satu operasi karena parameter ini sangat tergantung dari *material* benda kerja dan *material* dan ukuran mata pahat.



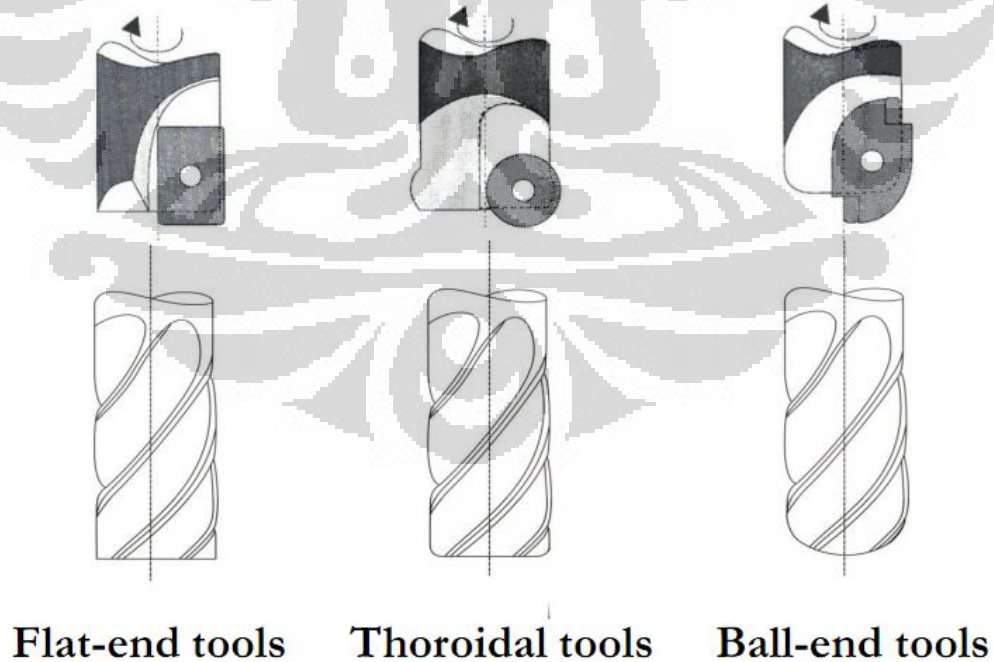
Copyright © 2008 CustomPartNet

Gambar 2.7 Visualisasi parameter pemesinan [17]

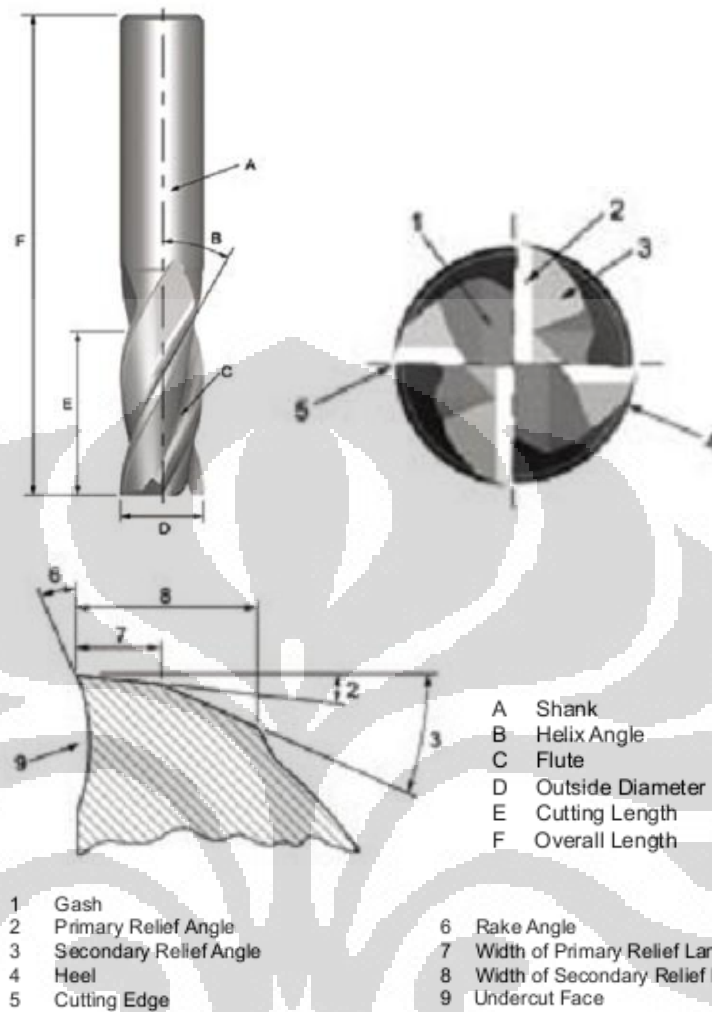
c. Mata Pahat Potong (*Cutting tool*)

Dalam proses pemesinan khususnya pemesinan *milling*, *Cutting tool* merupakan parameter yang banyak diperhatikan dalam proses pemesinan. Terdapat tiga jenis *Cutting tool* berdasarkan geometrinya, dan masing-masing memiliki fungsi yang unik.

- *Flat end mill* memiliki ujung pahat yang datar, sering digunakan untuk keperluan *roughing* dan operasi-operasi *milling* yang tidak memerlukan inklinasi dari pahat.
- *Thoroidal tool* atau kadang disebut *bull nose end mill* mirip seperti *flat-end mill*, namun di ujung dari mata pemotongnya diberikan radius sehingga menjadikannya memiliki lengkungan di bagian sisinya saja dan menyisakan bagian yang rata di tengah.
- *Ball nose end mill* memiliki bentuk setengah bola di bagian ujung pahat. Geometri ini membuatnya mampu dan sering dipakai untuk keperluan *finishing* dan meratakan permukaan yang berkontur.



Gambar 2.8 Jenis-jenis pahat [12]



Gambar 2.9 Spesifikasi bagian Cutting tool [18]

Berikut ini tipe – tipe *material cutting tool*:

- 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.

- 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*.

- *Cemented Carbide*

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

- *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:

- Keramik dengan *cold – pressed*, terdiri dari Al_2O_3 *cold pressed* yang dimasukkan kedalam proses dan di *sintering* pada temperature tinggi.
- 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*.

- *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 memanfaatkan sistem CAD/CAM

Proses manufaktur berbicara mengenai setiap tahapan dari proses pengerjaan benda kerja mentah (awal) menjadi benda yang memiliki geometri

sesuai dengan perencanaan dan perancangannya. Dimulai dari perancangan konsep spesifikasi dan fungsi dari benda yang akan dikerjakan, proses pemodelan geometri menggunakan *software* CAD, lalu perencanaan lintasan pahat menggunakan *software* CAM serta tidak lupa verifikasi dan visualisasi proses pelepasan *materialnya*, lalu sampai kepada proses pemesinan menggunakan *machine tool* aktual.

Sistem CAD merupakan langkah awal yang pada umumnya diambil oleh praktisi. Pemodelan geometri berguna untuk memvisualisasikan dan menuangkan setiap fungsi dan spesifikasi produk ke dalam sebuah bentuk solid geometri. Pemvisualisasian tersebut sangat membantu dalam pengerjaan benda kerja yang akan dilakukan. Sedangkan sistem CAM merupakan sebuah *software* yang pada penelitian ini berfungsi untuk membuat jalur atau lintasan pahat untuk keperluan pemodelan pemesinan *milling* dan pemesinan *milling* aktual berdasarkan geometri benda jadi yang diambil dari sistem CAD. Oleh karena itu, integrasi antara sistem CAD dan CAM dibutuhkan untuk mempermudah perpindahan data dan komunikasi antara dua sistem *software* tersebut.

Proses manufaktur berbasis sistem CAD/CAM menjadi paket yang sudah dikenal banyak praktisi manufaktur karena sejumlah keuntungan-keuntungan yang ditawarkannya. Namun, pengintegrasian sistem CAD/CAM membuat nilai fungsional dari keduanya menjadi lebih bermanfaat. Selain itu, kapabilitas dari sistem CAM dinilai lebih berperan dalam kesuksesan sebuah proses manufaktur berbasis sistem CAD/CAM. Beberapa keunggulan yang ditawarkan oleh sistem CAD/CAM adalah diantara lain:

- Pengenalan permukaan pemesinan (*feature recognition*)
- Pembuatan *tool path*
- Verifikasi *tool path*
- Pendeteksian benturan

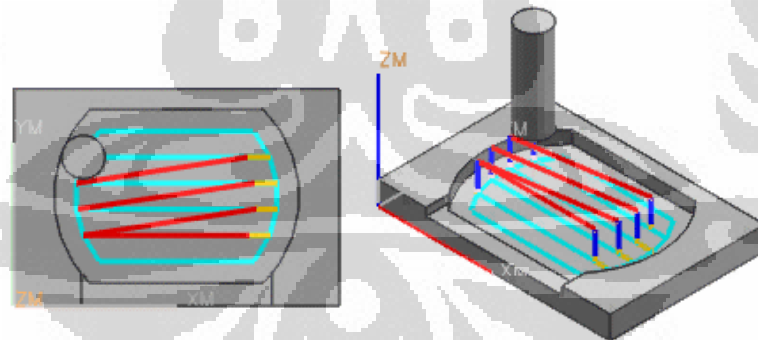
Seperti dijelaskan sebelumnya, sistem CAM membuat segala sesuatunya menjadi lebih mudah bagi para machinist karena berbagai fitur yang kebanyakan menawarkan otomasisasi dan visualisasi dari tahap-tahap proses pemesinan. Pembuatan *tool path* secara otomatis yang mana menghasilkan jalur-jalur atau lintasan-lintasan pahat sesuai yang pada akhirnya secara akumulatif akan

melakukan pemesinan untuk menjadikan benda kerja yang diinginkan sesuai geometri-geometri yang dibuat. Kemudian fungsi verifikasi *tool path* sangat menolong machinist untuk melakukan pengecekan terhadap proses pemesinan yang akan dikerjakan secara aktual nantinya dan menghindari hal-hal yang tidak diinginkan terjadi saat proses pemesinan. Verifikasi *tool path* menunjukkan beberapa hal seperti dijelaskan sebagai berikut:

- Apakah pahat membuang cukup *material* dari benda kerja
- Apakah pahat membentur clamp atau fixture saat melakukan gerak pendekatan (approaching)
- Apakah pahat melintasi dasar atau sisi kantong atau rusuk
- Apakah *tool path* sudah optimum atau belum

Berikut akan dijelaskan beberapa definisi yang digunakan dalam sistem CAM :

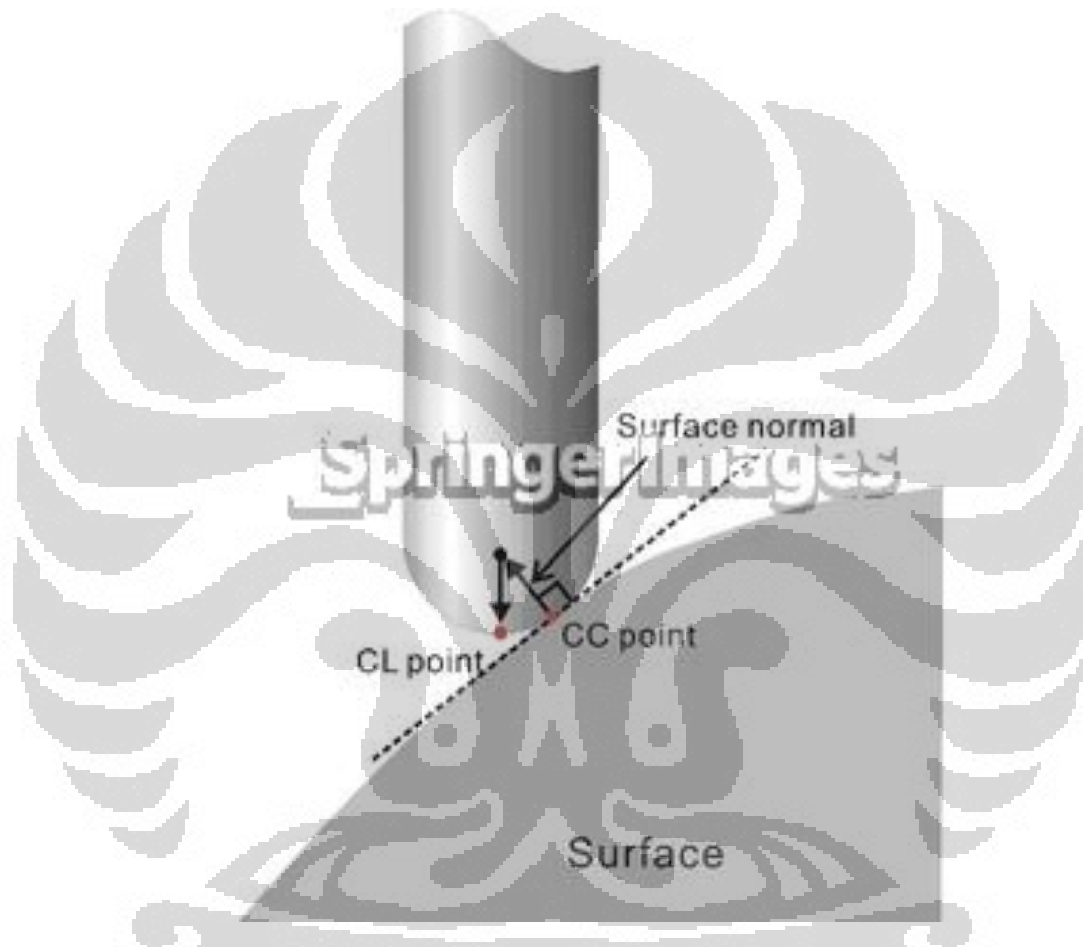
- *tool path* merupakan lintasan atau jalur yang akan dilewati oleh pahat atau *Cutting tool* pada proses pemesinan nantinya. Lintasan ini terdiri dari titik-titik yang merepresentasikan letak atau posisi dari *cutter location point* pada permukaan benda kerja.



Gambar 2.10 Contoh lintasan pahat [19]

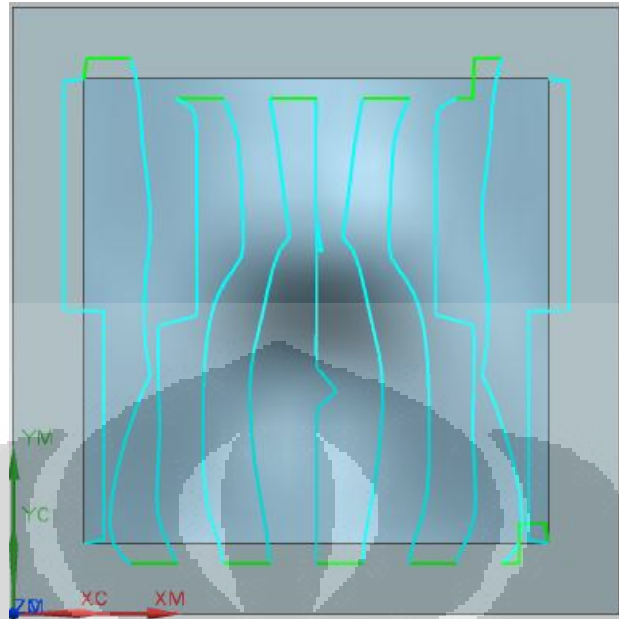
- *Cutter location point* merupakan sebuah titik yang merepresentasikan titik tengah yang menjadi acuan dari posisi *Cutting tool* atau pahat. Jika dilihat dari pahat, letak dari *cutter location point* ini berada di bagian bawah tengah dari pahat, apapun jenis mata pahatnya.

- *Cutter contact point* merupakan titik dimana bagian pahat mengenai bagian dari benda kerja. Titik dimanapun bagian pahat terkena kontak dan mengerjakan pemesian terhadap benda kerja disebut *cutter location point*.

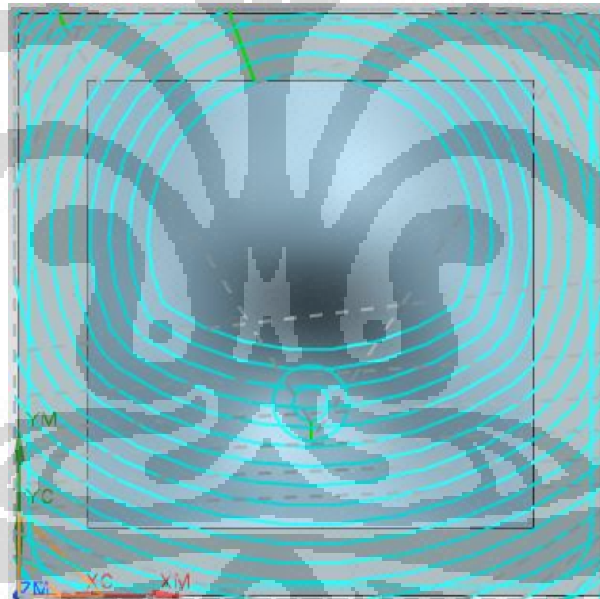


Gambar 2.11 *Cutter contact* dan *cutter location point* [20]

- *tool path pattern* merupakan pola lintasan pahat yang menjadi acuan dari pembuatan lintasan pahat. Walaupun berbeda-beda geometri benda kerja, pola lintasan pahat secara umum menjadi acuan untuk arah dan bentuk lintasan pahat.



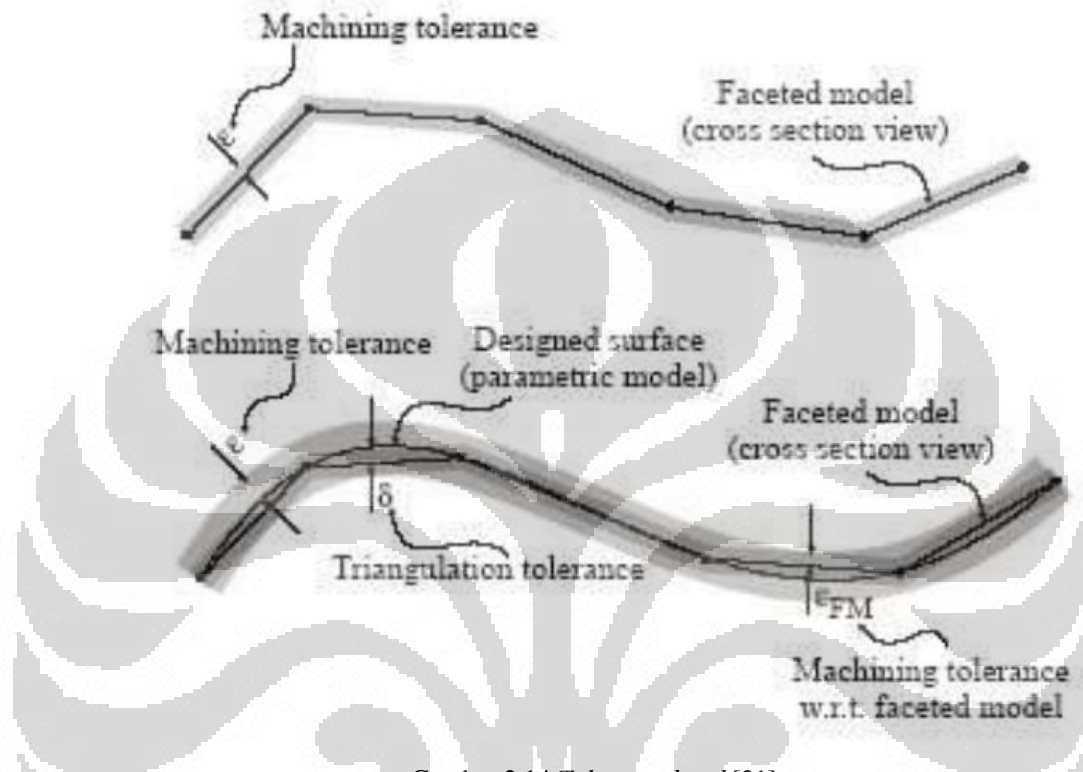
Gambar 2.12 Contoh pola lintasan pahat paralel



Gambar 2.13 Contoh pola lintasan pahat spiral

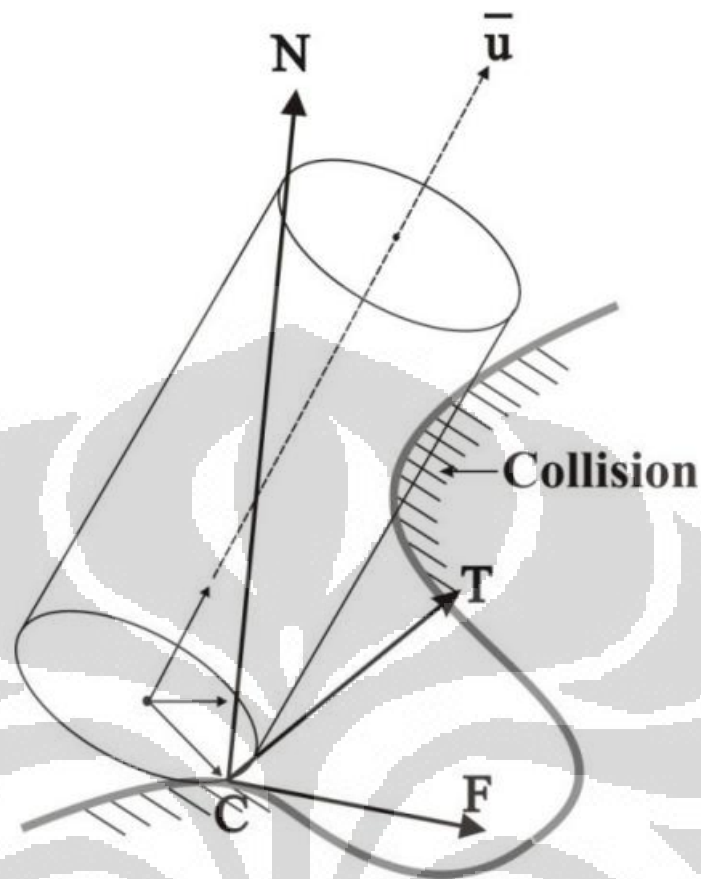
- *Tolerance band* merupakan nilai toleransi yang dibuat dengan cara menggambarkan offset dari permukaan benda kerja sejauh nilai toleransi, kearah dalam benda kerja atau ke bawah disebut *intol*, sedangkan kearah luar benda kerja disebut *outol*. Lintasan pahat yang masih berada dalam

toleransi tersebut dianggap sudah memenuhi keperluan dan spesifikasi pemesinan walaupun tidak tepat berada pada permukaan benda kerja.



Gambar 2.14 Tolerance band [21]

- *Collision* dan *gouging* merupakan dua “tabrakan” yang mungkin terjadi di dalam proses pemesinan. Tabrakan disini maksudnya adalah gerakan kontak antara pahat dan benda kerja atau bagian dari mesin yang tidak diinginkan. *Collision* berarti kontak yang tidak diinginkan antara bagian pahat diluar *flute length* dengan benda kerja ataupun dengan bagian mesin. Sedangkan *gouging* berarti kontak yang tidak diinginkan yang terjadi antara pahat (bagian *cutting edge* atau masih di dalam *flute length*) dengan benda kerja, sering disebut *overcut*.



Gambar 2.15 Contoh kejadian *collision* [12]

Terdapat beberapa jenis pergerakan dari *cutting tool* selama proses pemesinan. Dua kelompok besar kategori pergerakan ini adalah *cutting moves* dan *non-cutting moves*. *Cutting moves* adalah pergerakan-pergerakan *cutting tool* yang mana pergerakan tersebut bermaksud untuk melakukan proses pelepasan *material* terhadap benda kerja. Sedangkan, *non-cutting moves* merupakan pergerakan *tool* yang tidak melakukan proses pengerjaan pelepasan *material*. Terdapat beberapa pergerakan *cutting moves* dan *non-cutting moves*, diantaranya adalah:

Cutting Moves




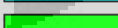




- *First Cut* merupakan segmen *tool path* yang melakukan proses pelepasan *material* setiap kali pertama *cutting tool* bertemu benda kerja setelah pergerakan engage.

- *Step-over* merupakan pergerakan yang menghubungkan dua segmen *tool path* (*tool path passes*) yang berdekatan dalam pola lintasan pada satu *area* atau level pemesinan.

Non-Cutting Moves

- *Approach* merupakan segmen *tool path* yang mana adalah pergerakan pendekatan *cutting tool* dari titik *clearance* menuju atau mendekati benda kerja.
- *Engage* merupakan segmen *tool path* yang menunjukkan pergerakan *cutting tool* dari posisi *approach* menuju ke pergerakan *first cut* atau pergerakan pemotongan pertama.
- *Retract* merupakan pergerakan *cutting tool* saat pertama menjauh dari benda kerja ketika menyelesaikan satu *pass* atau satu *area/level* pemotongan atau pun ketika menyelesaikan satu operasi.
- *Departure* merupakan pergerakan dari pergerakan *retract* menuju kepada *clearance*.
- Pergerakan *depart* dan *approach* dihubungkan oleh beberapa pergerakan;
 - *Rapid moves* yaitu pergerakan di atas *clearance plane*.
 - *Traverse moves* merupakan pergerakan dibawah *clearance plane*.

Dalam *software* CAM yang digunakan pada penelitian kali ini, setiap segmen *tool path* ditandai dengan warna berbeda untuk kemudahan display dari *tool path*.

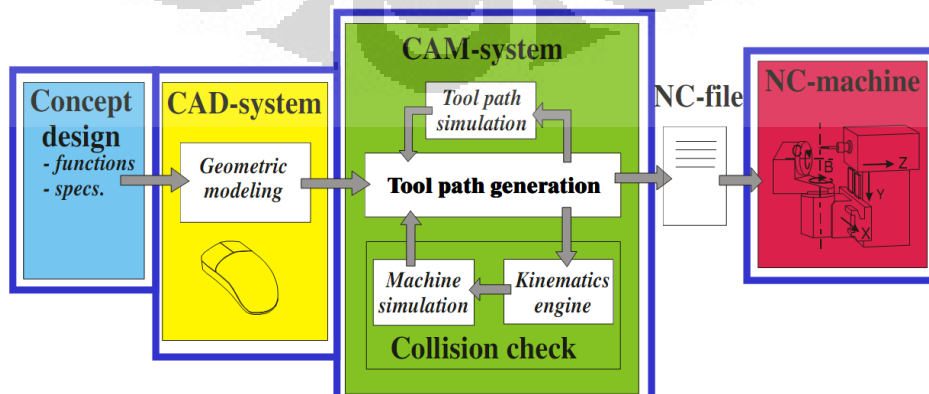
Rapid	
Approach	
Engage	
First Cut	
Stepover	
Cut	
Traversal	
Retract	
Departure	

Gambar 2.16 Warna penanda segmen-segmentool path pada display *software* [19]

BAB 3

PROSES MANUFAKTUR CETAKAN MIKRO

Proses manufaktur cetakan mikro meliputi setiap tahapan dari awal perencanaan sampai kepada proses *machining* terakhir. Dalam bab ini akan dijelaskan setiap tahapan dalam penelitian ini. Awal dari semua proses produksi harus selalu dari konsep desain atau perancangan produk. Di tahap ini, fungsi, spesifikasi serta gambaran umum operasional produk sudah siap untuk dikembangkan. Oleh karena itu, pemahaman tentang tujuan fungsional dari cetakan mikro menjadi hal pertama yang harus didiskusikan. Seperti dijelaskan sebelumnya, cetakan mikro tentunya berfungsi sebagai komponen utama dari proses *injection molding*, dan tercapainya ukuran cetakan yang berskala mikro ini bertujuan sebagai penelitian lebih lanjut demi kemajuan pemahaman dan teknologi proses pembuatan atau kegiatan produksi produk-produk mikro yang semakin diperlukan di hari-hari belakangan ini dan seterusnya. Sedangkan permukaan *sculptured* merupakan profil yang semakin populer dalam aplikasi di berbagai bidang; aircraft, aerospace, automotive, electronic, dan lain-lain. Kebutuhan akan bentuk streamline yang memiliki daya gesek/ gaya tahan terhadap fluida yang lebih menguntungkan dalam aplikasinya pada kendaraan menjadi salah satu dari sekian alasan semakin digemarinya *sculptured surface*. Namun pemesinan profil *sculptured* merupakan salah satu tantangan tersendiri karena tingkat kompleksitas permukaan.



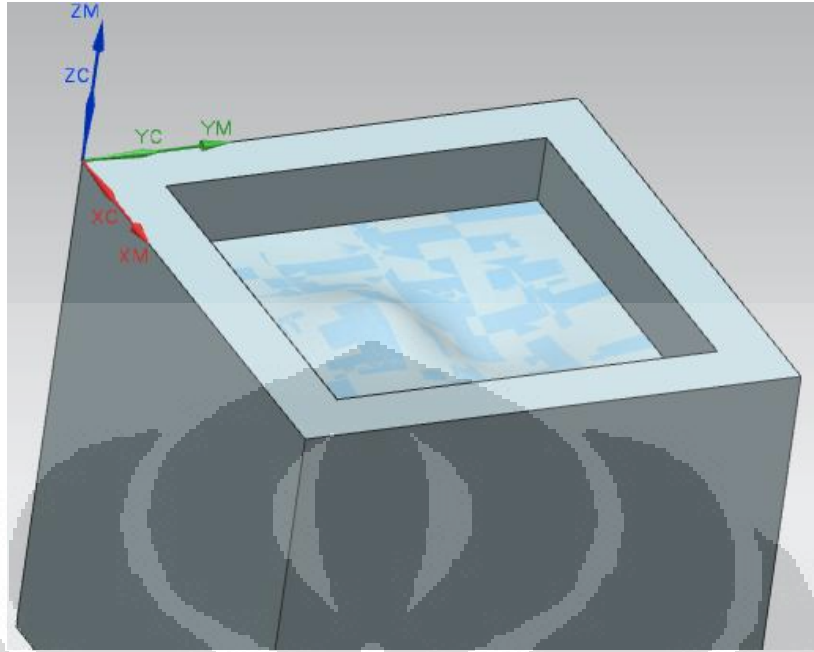
Gambar 3.1 Alur kerja proses manufaktur dengan mesin *CNC* lewat *CAD/CAM* [12]

3.1. Desain CAD

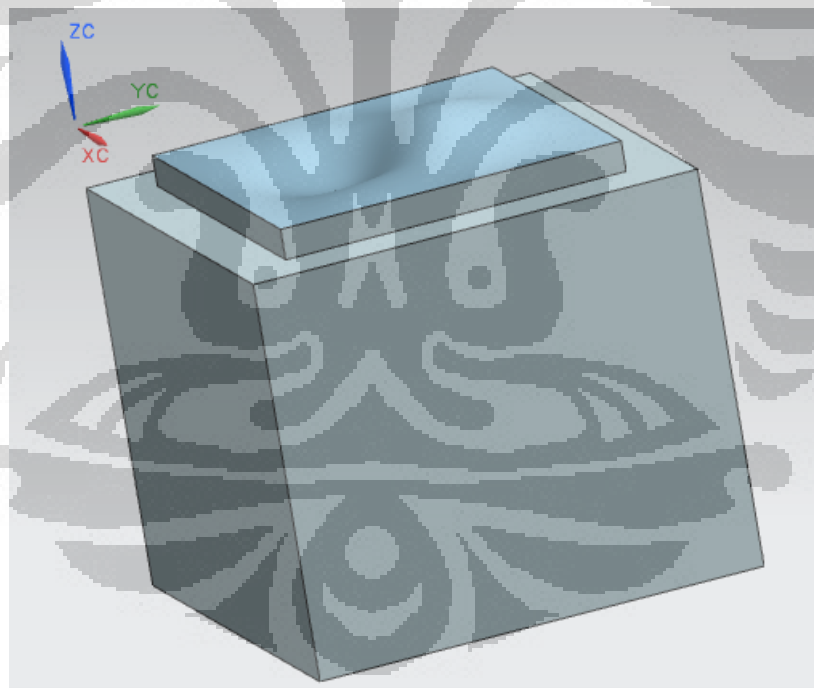
Proses manufaktur yang dilakukan dalam penelitian kali ini diinisiasi dengan kegiatan pemodelan rancangan benda kerja. Cetakan mikro sebagai benda kerja yang dikerjakan dalam penelitian ini dirancang pemodelan 3D-nya terlebih dahulu sebelum bisa dilakukan pemodelan dan perancangan lintasan pahat (*tool path*) serta visualisasi pemakanan dan akhirnya diproduksi/dikenakan proses pemesinan. Dalam penelitian ini dilakukan beberapa percobaan pemesinan terhadap beberapa model permukaan yang dianggap memiliki bentuk/ *profile* yang cukup kompleks sehingga kapabilitas pemesinan 3 axis dapat teramati, terbukti dan terukur. Produksi beberapa model cetakan ini terbatas hanya untuk tujuan tersebut, sedangkan penekanan atau fokus dalam penulisan laporan ini hanya akan menggunakan satu model cetakan, yaitu *sculptured surface male mold*. Berikut akan dijelaskan proses pengerjaan perancangan model-model 3D yang dikerjakan selama penelitian kali ini secara detail.

a. Cetakan *sculptured surface male* dan *female mold*

Cetakan mikro *male* inilah yang menjadi objek dari fokus penelitian kali ini karena dianggap mempunyai bentuk *surface* dengan kurvatur yang cukup tinggi tingkat kesulitannya. Cetakan ini memiliki sebuah gunung atau bukit dan sebuah lembah yang terletak di tengah-tengah sebuah *island*. *Island* yang dimaksudkan disini adalah geometri persegi yang mempunyai dimensi lebih kecil dari persegi benda kerja dan dibuat menonjol di tengah-tengah geometri benda kerja. Cetakan *micro sculptured female* dipersiapkan sebagai model *mold* pasangan dari model *mold male*. Keduanya secara bersama membentuk sebuah cetakan mikro (termasuk tipe *multiple use mold* dan *closed mold*) yang lengkap. Perbedaan dari model *female* dengan model *male* terletak pada geometri fungsionalnya, dimana model *female* memiliki pocket yang berfungsi sebagai cavity (tempat *molten material*) dari cetakan. Selain dari pada itu, bentuk dari permukaan cetakan *female* ini serupa dengan permukaan *male*, dengan sebuah gunung atau bukit dan sebuah lembah. Geometri gunung dan lembah ini sering disebut juga dengan istilah *concave-convex area/region*.



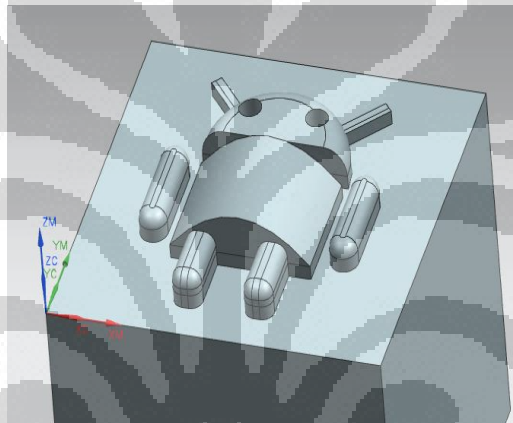
Gambar 3.2 *Sculptured surface male mold*



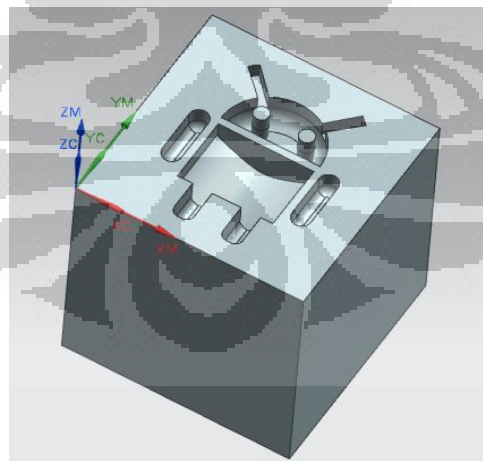
Gambar 3.3 *Sculptured surface female mold*

b. Logo android *male* dan *female*

Model berikutnya yaitu cetakan logo android *male*. Geometri dari model ini diadaptasi dari model merk android dan dibuat timbul keluar seperti bentuk *emboss*. Lengkap dengan bagian kepala, badan, tangan, kaki serta telinga, model ini diproduksi dengan ukuran benda kerja yang sangat kecil dan tentunya tidak biasa sehingga . Untuk model logo android yang *female*, mirip dengan perbedaan antara model 1 dan 2 yaitu terdapat pocket atau pool yang menjadi cavity untuk tempat memadatnya lelehan *material* penyusun benda kerja.



Gambar 3.4 Model logo android *male mold*



Gambar 3.5 Model logo android *female mold*

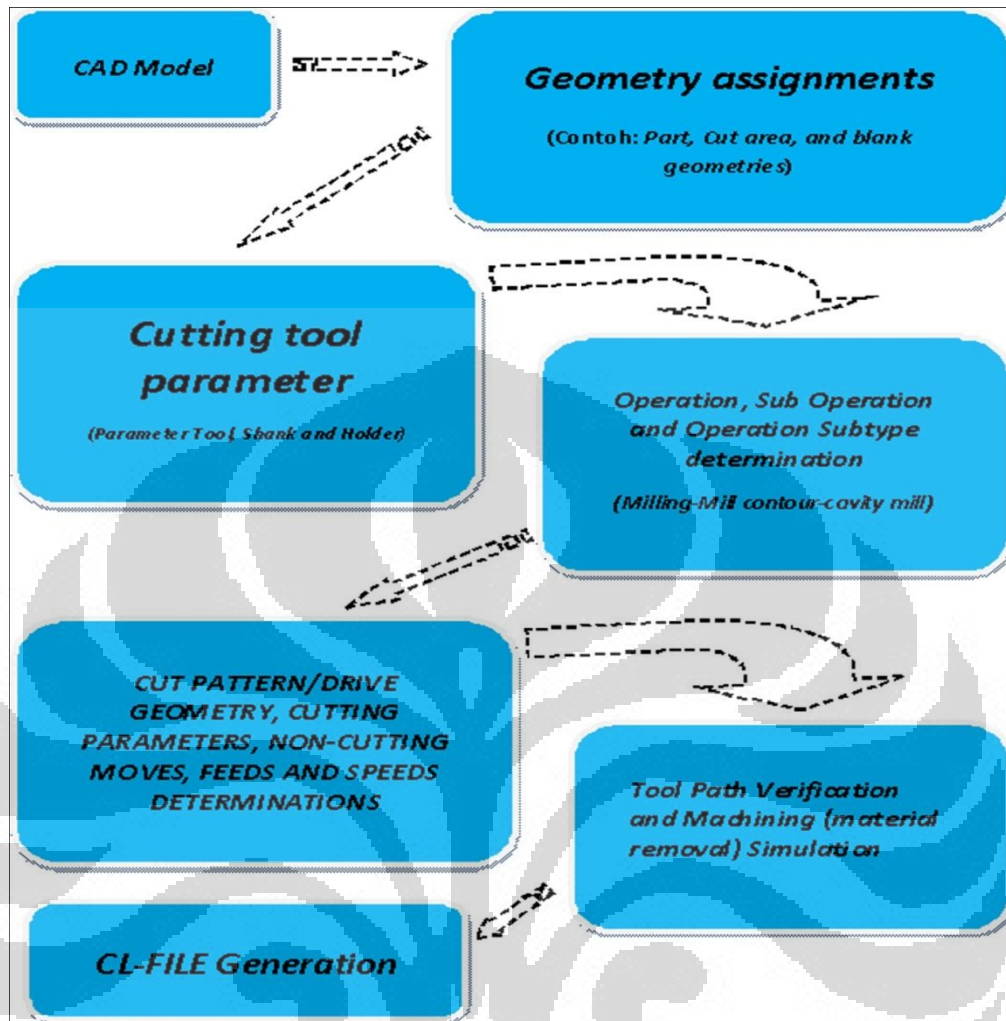
3.2. CAM programming dan CL-File generation

Proses pemesinan *milling* yang dipilih menjadi operasi pemesinan yang dilakukan dalam penelitian kali ini merupakan salah satu operasi pemesinan yang pengembangan dan pembelajarannya sudah cukup *mature* dan *robust*. Oleh karena itu, mudah untuk menemukan *software* CAM yang memiliki fitur operasi manufaktur *milling* di dalamnya. Sistem CAM yang digunakan dalam penelitian kali ini memiliki fitur operasi *milling* yang baik, dimana banyak pilihan jenis operasi *milling* yang dapat dipergunakan sesuai kebutuhan dan perencanaan yang dipilih. Pembuatan lintasan pahat (*tool path*) untuk produksi setiap cetakan mikro yang dikerjakan dalam penelitian ini kesemuanya dilakukan dengan bantuan sistem CAM. Penjelasan setiap langkah perancang *tool path* setiap model yang diproduksi akan dijelaskan secara rinci. Semua proses dimulai dari hasil model CAD 3D yang kemudian diproses dan dikenakan proses manufaktur *milling* dalam sistem CAM untuk mendapat *tool path*nya.

Hal yang pertama kali harus dilakukan begitu berada dalam *manufacturing environment* adalah memilih operasi pemesinan apa yang akan dijalankan untuk proses produksi benda kerja. Terdapat banyak jenis operasi yang tersedia atau *built in* dalam setiap CAM *software* contohnya dalam *software* Siemens NX8 antara lain adalah operasi *turning*, operasi *milling*, operasi *wire-EDM*, dan beberapa operasi lainnya. Bahkan, didalam operasi *milling* pun terdapat banyak sub-tipe operasi beberapa contohnya adalah seperti suboperasi *mill planar*, suboperasi *mill contour*, suboperasi *mill multiaxis*, dan suboperasi *mill multiblade*. Dalam setiap sub-operasi terdapat beragam *operation subtype* yang masing-masing memiliki karakteristik unik yang memiliki fungsi yang juga relatif spesifik seperti *operation subtype face area mill* (dalam suboperasi *planar mill*), *operation subtype cavity mill* (dalam suboperasi *mill contour*). Setelah pemilihan jenis operasi, suboperasi, dan *operation subtype* yang diinginkan dan diperlukan telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah dengan mengatur parameter-parameter yang diperlukan dan tersedia di dalam masing-masing pilihan spesifik tersebut.

Operasi *milling* menjadi pilihan untuk operasi *micro-milling* yang dilakukan dalam penelitian ini. Didalam operasi *milling*, parameter awal yang perlu ditentukan adalah parameter-parameter untuk *cutting tool-cutting tool* yang

akan dipakai, bisa dibuat lebih dari satu *cutting tool*. Namun, bila masih belum perlu ditentukan, pemilihan *Cutting tool* bisa ditunda di tahap berikutnya. Dalam manufacturing environment, dasar dari penetapan geometri pemesinan diambil dan diadaptasi dari model 3D benda kerja yang telah dibuat. Beberapa geometri yang harus ditetapkan adalah *part geometry*, *cut area/cut geometry* dan *blank geometry*. *Part geometry* menunjukkan bagian-bagian atau *part* mana saja yang mempresentasikan benda/produk jadi setelah diproses pemesinan. *Cut area/cut geometry* adalah bagian atau *part* mana yang di *area* tersebutlah *Cutting tool* melakukan proses pemakanan. *Blank geometry* merupakan bagian yang akan menjadi *blank material* dari benda kerja, atau dengan kata lain adalah bagian yang akan dimakan oleh *cutting tool*. Kesemua geometri tersebut bersama dengan beberapa geometri lainnya yang terkadang adalah geometri tambahan dan *optional*, dirangkum atau dikumpulkan dalam sebuah *geometry set*. *Geometry set* inilah yang juga menentukan *machine coordinate system* dimana posisi dan orientasi *Cutting tool* ditentukan sehingga proses pemakanan di bagian-bagian *part* yang berbeda arah vektor normalnya dengan sumbu *Cutting tool* dapat dilakukan secara terpisah dengan mengelompokkan mereka di dalam *geometry set* yang berbeda.



Gambar 3.6 Alur CAM Programming

Tahap selanjutnya adalah mengatur beberapa parameter pemesinan seperti *cutting pattern*, *cutting parameter*, *machining strategy*, *non-cutting moves* dan fitur-fitur khusus yang tersedia di masing-masing *operation subtype* lainnya. *tool path generation* atau pembuatan lintasan pahat baru bisa dilakukan setelah semua parameter yang diperlukan telah ditetapkan/diinput. *CL-File generation* merupakan pekerjaan yang beraktifitas mengenerasi lintasan pahat yang akan diikuti oleh pergerakan *cutting tool*. Modul ini membantu memudahkan *machinist* untuk dapat memvisualisasikan lintasan mata pahat agar dapat dianalisis, dievaluasi dan diperbaiki. Keperluan visualisasi lintasan pahat ini salah satunya adalah untuk mendeteksi gouging yang mungkin terjadi. Setelah penampilan lintasan pahat,

proses pemesinan yang divisualisasikan atau disimulasikan membuat para machinist dimudahkan dalam mempersiapkan proses pemesinan, ini merupakan salah satu keunggulan dari fitur utama *CAM system*. *IPW (In-Progress Workpiece)* merupakan fitur yang membantu dalam menyediakan tampilan visual *material* sisa dari proses pemesinan. Fitur ini menggunakan teknologi *exhaustive enumeration*, atau disebut *voxel* (diskritisasi objek menjadi kubus-kubus kecil, semakin kecil kubus, semakin berkualitas grafiknya, namun memerlukan *graphic card* yang mumpuni) yang mana proses pelepasan *material* berarti membuang bagian *voxel-voxel* yang terlewati oleh *tool path* [12]. Hal ini menjadi sangat penting mengingat bahwa ketebalan *material* sisa atau sering disebut *part stock* adalah parameter yang diperlukan dalam perhitungan *depth per cut* atau kedalaman makan dari proses berikutnya. Jika semua tahap tersebut sudah dilakukan dengan benar, maka langkah selanjutnya adalah dengan membuat *CL-File*nya, maka tinggal selangkah lagi untuk memulai pemesinan benda kerja secara aktual.

a. Cetakan *micro sculptured surface male*

Proses pertama adalah dengan membuat model 3D dari cetakan ini seperti telah ditunjukkan dalam gambar di atas. Begitu masuk ke dalam *environment manufacturing*, maka langkah-langkah yang telah dijelaskan sebelumnya dapat dikerjakan sampai kepada *CL-File generation*. Berikut adalah tahapan-tahapan yang dilakukan untuk membuat cetakan *micro sculptured surface male*.

Tabel 3.1 *Cutting parameter* pada operasi *Face milling area Roughing*

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 3.2 *Cutting parameter pada Z-Level Roughing*

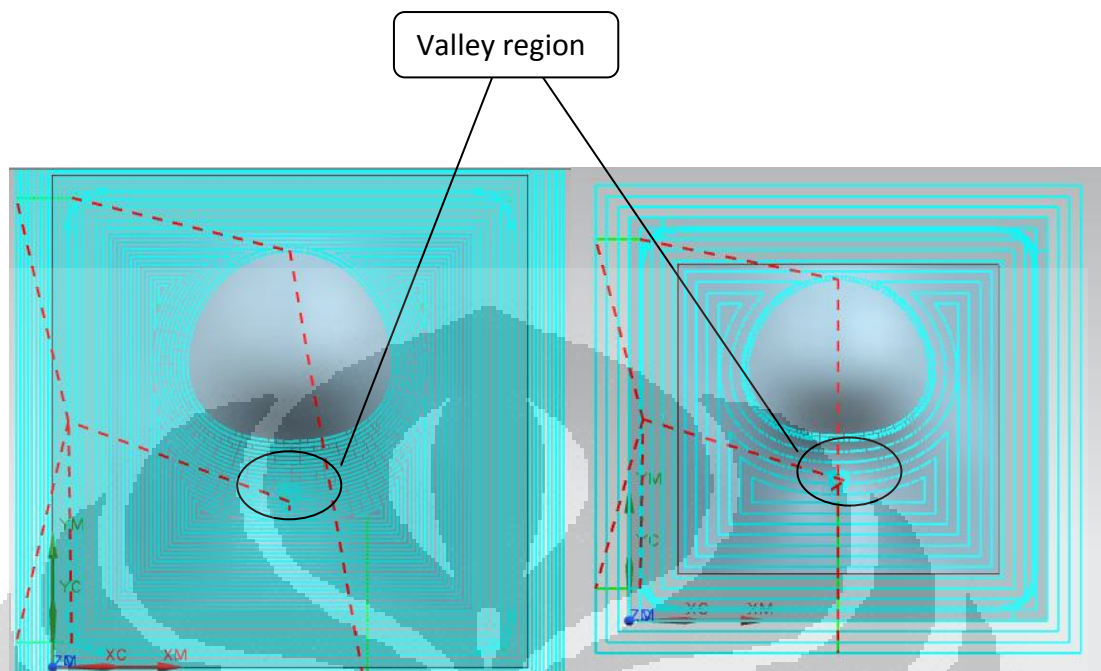
Z-level profile			
Climb milling Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.03	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm
Extend at edges	55% tool		
Roll tool over edges	Yes		
smoothing in all passes	50% tool		

Tabel 3.3 *Speed factor*

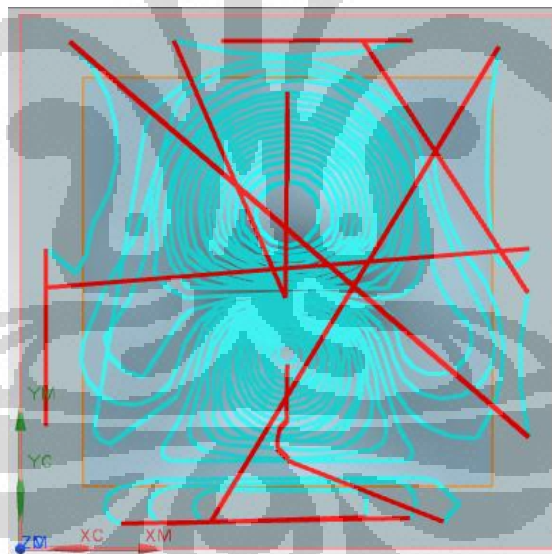
Speed factors (z-level profile)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	75000-100000 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	47 mm/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate

Table 3.4 *Speed factor*

Speed factors (face area mill)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	75000-100000 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	117 mm/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.7 *Roughing cut pattern* (simplifikasi dan aktual)



Gambar 3.8 *Z-level profile tool path*

Proses *roughing* yang dilakukan bertujuan untuk memakan *material* sebanyak-banyaknya dengan seefisien mungkin agar *allowance stock* yang ditinggalkan cukup untuk dikerjakan oleh proses selanjutnya yaitu proses *semi-finishing* dan *finishing*. Efisiensi waktu pemakanan menjadi hal paling penting

dalam operasi ini. Di dalam pengerjaan operasi *roughing* model *sculptured male mold* ini, dilakukan dua tahap *roughing*; *face area mill* dan *z-level profile mill*. Pada operasi pertama, yang dilakukan adalah operation subtype *face milling area* dengan menggunakan *cutting tool flat end-mill 0.5 diameter*. Pahat ini adalah ukuran terbesar yang digunakan dalam penelitian ini (di luar *Cutting tool* untuk keperluan facing yang berdiameter 2 mm), dengan ukuran pahat yang relatif besar, proses *roughing* akan membuang banyak *material* dengan waktu yang relatif lebih singkat dibandingkan pahat yang lebih kecil. Selain itu, penggunaan *flat-end mill* pada tahap ini dikarenakan kebutuhan akan *floor* yang datar di bagian bawah dari *part island* (timbul) dan juga karena belum diperlukannya *contouring* pada permukaan *sculptured* pada proses *roughing*. *Part stock* pada operasi ini dibuat 0.00 mm, namun maksud dari pemberian nilai tersebut adalah nilai *floor stock* di bagian bawah yang berbentuk planar. Sedangkan untuk bagian *island* (timbul), dimana terdapat *sculptured surface* ditetapkan nilai *part stock* sebesar 0.1 mm karena hanya dikenakan satu kali *depth per cut* (0.1 mm), kecuali di bagian puncak yang disisakan dari sejak *blank part*, dan bagian lembah dimana dikenakan dua kali *depth per cut*. Sisa *blank* yang diharapkan habis adalah di bagian bawah atau bagian yang *planar saja*, sedangkan di bagian atas atau bagian permukaan *sculptured* diharapkan masih menyisakan *blank material* untuk operasi *finishing*. Pengaturan *machining tolerance* atau *tolerance band outol* dan *intol* sebesar 0.002 mm merupakan percobaan *trial and error* dimana nilai tersebutlah yang didapatkan untuk memperoleh hasil pemesinan seperti dijelaskan sebelumnya. Sebenarnya nilai *tolerance* sekecil itu untuk proses *roughing* tidak umum ditemukan pada praktek pemesinan, karena *surface accuracy* yang diperlukan dalam proses *roughing* tidak menjadi faktor yang menentukan. Namun dalam proses ini, dikehendaki sebuah operasi untuk menghabiskan *floor* atau dasar bagian bawah *island*, namun masih menyisakan *blank material* di bagian *sculptured surface* untuk proses berikutnya yang lebih memperhatikan *surface tolerance*. Ketika nilai 0.002 mm dipergunakan sebagai nilai *intol* dan *outol*, kebutuhan proses seperti yang dikehendaki akhirnya tercapai sehingga nilai tersebutlah yang dikenakan dalam pemesinan.

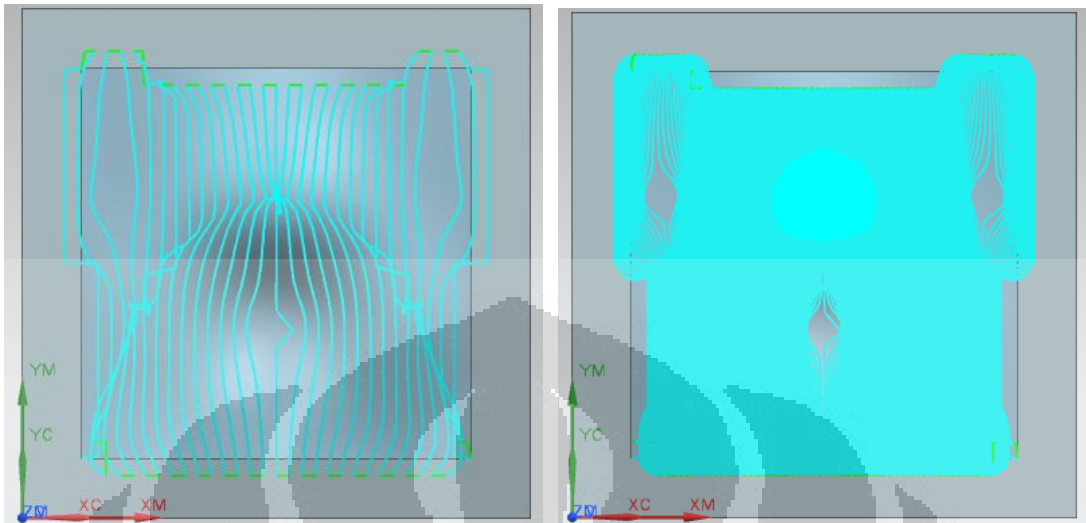
Setelah menggunakan *cutting tool* berdiameter 0.5 mm, masih dalam proses *roughing*, dipilih operation *subtype z-level milling*, dimana proses ini bertujuan memakan di *area-area* yang masih relatif lebih tebal dari sekelilingnya, sehingga proses selanjutnya mempunyai beban pemakanan yang lebih ringan. Maka diberikanlah ketebalan akhir sisa pemakanan *roughing* sebesar 0.03 mm untuk proses selanjutnya (*semi-finishing* dan *finishing*).

Tabel 3.5 *Cutting parameter pada Contour area-Semi finishing*

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	0.03	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract
outol	0.01	Clearance	1mm
Extend at edges	55% tool		
Extend at convex corner	yes		
Roll tool over edges	Yes		

Tabel 3.6 *Speed factor*

Speed factors (contour area 0.2 mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	75000-100000 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	47 mm/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.9 *Semi finishing tool path* (actual dan simplifikasi)

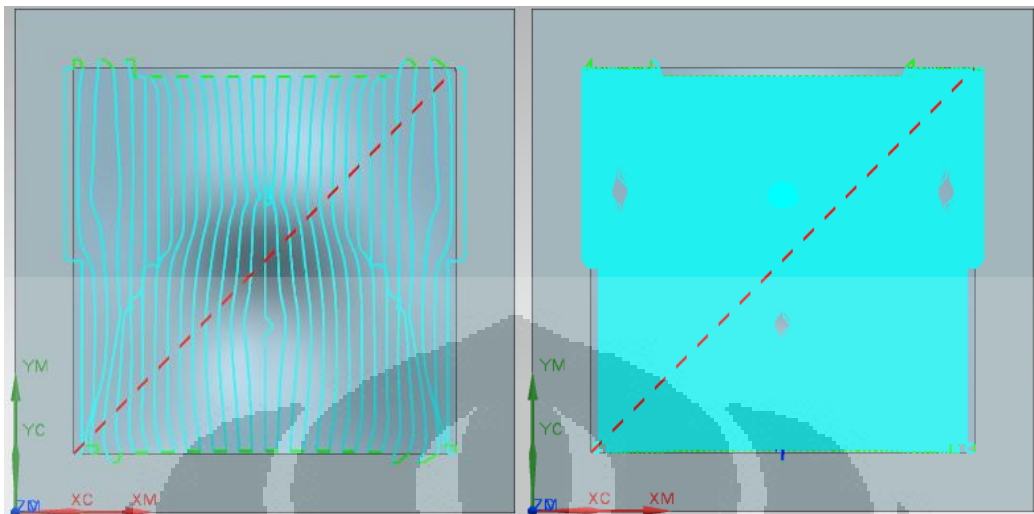
Proses *semi-finishing* dilakukan dengan menggunakan *flat end mill* diameter 0.2 mm yang sama seperti proses sebelumnya, sehingga tidak diperlukan pergantian *cutting tool*. Proses ini bertujuan untuk memakan sisa *material* dari proses *roughing* namun tidak sampai menyentuh permukaan benda kerja, oleh karena itu, setelah proses ini masih disisakan blank *material* setebal 0.025 mm atau hanya memakan sedalam 0.005 mm. Hal ini dilakukan untuk pembentukan kontur yang serupa dengan kontur permukaan benda kerja agar pekerjaan *contouring finishing* lebih ringan karena lewat tahap *semi-finishing* ini dipastikan bahwa bentuk permukaan benda kerja sudah terlihat. Proses ini menggunakan *flat end mill* sehingga saat membentuk kontur permukaan, hasilnya dapat terlihat masih terbentuk “tangga” yang merupakan kompensasi kemiringan/kecuraman geometri yang tidak mungkin dicapai *flat end mill* 3 axis. Namun hal tersebut tidak menjadi masalah karena tujuan dari proses *semi-finishing* ini bukanlah permukaan akhir benda kerja.

Table 3.7 *Cutting parameter pada Contour area Finishing*

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	Plunge 200% 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 3.8 *Speed factor*

Speed factors (contour area 0.1mm)	
feed rate	1 mm/s
Spindle speed	75000-100000 RPM
Feed per tooth	0.0004 mm
cutting speed	23 mm/min
approach	rapid
engage	50% feed rate
first cut	50% feed rate
step over	100% feed rate
traversal	rapid
retract	50% feed rate



Gambar 3.10 *Finishing tool path* (aktual dan simplifikasi)








Proses terakhir yaitu proses *finishing* yang melibatkan *cutting tool ball nose-end mill* berdiameter 0.1 mm. Proses *finishing* selalu mendapat penekanan yang lebih daripada proses lainnya karena proses ini sangat menentukan permukaan benda kerja final, *surface accuracy*, *surface roughness*, *surface quality* menjadi parameter yang sangat bergantung dari kualitas proses *finishing* ini.

Kebanyakan parameter pemesinan yang dipakai dalam penelitian mengacu kepada rekomendasi dari *tool's manufacturer* sebagai nilai aman dari penggunaan *cutting tool*. Namun pada prakteknya, parameter-parameter pemesinan yang dipakai nilai-nilainya lebih kecil daripada yang tertera dalam katalog dari *manufacturer*. Hal tersebut dilakukan dengan pertimbangan agar operasi pemesinan tetap berada dalam range aman dari *cutting tool* (supaya tidak mengalami *breakage* dan *rapid wearing*). Perhitungan nilai parameter pemesinan diawali dengan perbandingan nilai *spindle speed* katalog dengan aktual, sehingga nilai *cutting speed* dan *feed rate* yang ekuivalen dengan katalog juga didapatkan untuk setiap *depth per cut* dan *width per cut* yang tertera.

Dengan semua parameter pemesinan dan strategi pemesinan yang telah ditetapkan, lintasan pahat yang telah divisualisasikan, dan proses pemesinan yang disimulasikan maka langkah terakhir sebelum masuk ke tahap pemesinan adalah membuat CL-File atau *CL-File generation*.

ABRO™ - MINI - JM915/JM925- Cutting data

JM915/JM925

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	
3-4	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	
5-6	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	
7	M/A 48>56 HRc	0,45	0,05	320 (300-340)		n (rev/min)	101890	67900	50950	33930	23480	20320	16970	127320	10188	
						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)	4075	4075	4075	4075	4075	4075	4075	4075	4075	
7	M/A 56>62 HRc	0,30	0,05	130 (110-150)		n (rev/min)	413800	275870	206900	137930	103450	82760	68970	51730	41380	
						f_z (mm)	0,002	0,003	0,004	0,005	0,007	0,009	0,011	0,014	0,018	
						v_f (mm/min)	1490	1490	1490	1490	1490	1490	1490	1490	1490	
7	M/A 62>85	0,25	0,05	100 (80-120)		n (rev/min)	318310	212210	159160	106190	79580	63660	53050	39790	31830	
						f_z (mm)	0,002	0,002	0,003	0,005	0,008	0,008	0,013	0,013	0,018	
						v_f (mm/min)	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	

Gambar 3.11 Parameter pemesinan rekomendasi dari perusahaan pembuat pahat [22]

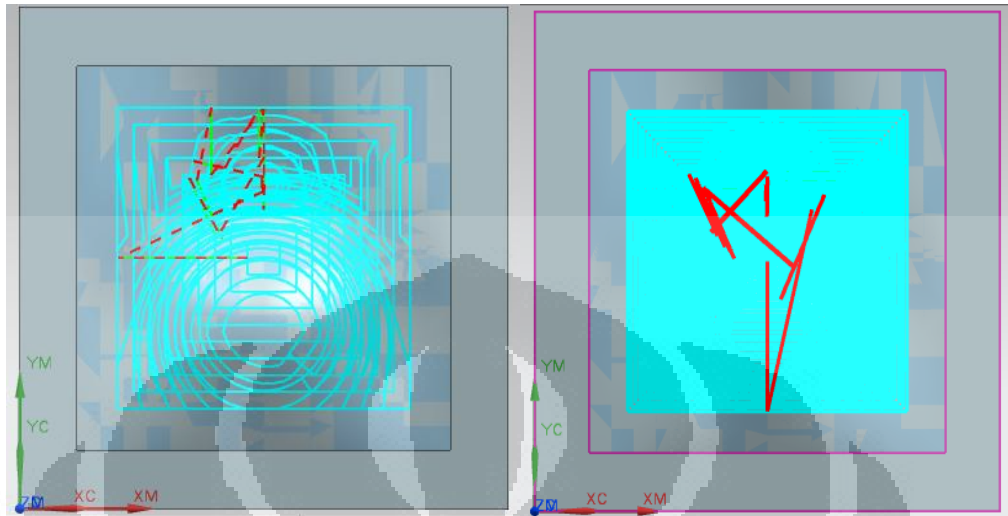
3.2.1. Proses pengerjaan lintasan pahat model-model lainnya dengan CAM system

Model-model selain *sculptured surface male mold* akan ditunjukkan secara (singkat) brief pada bagian ini.

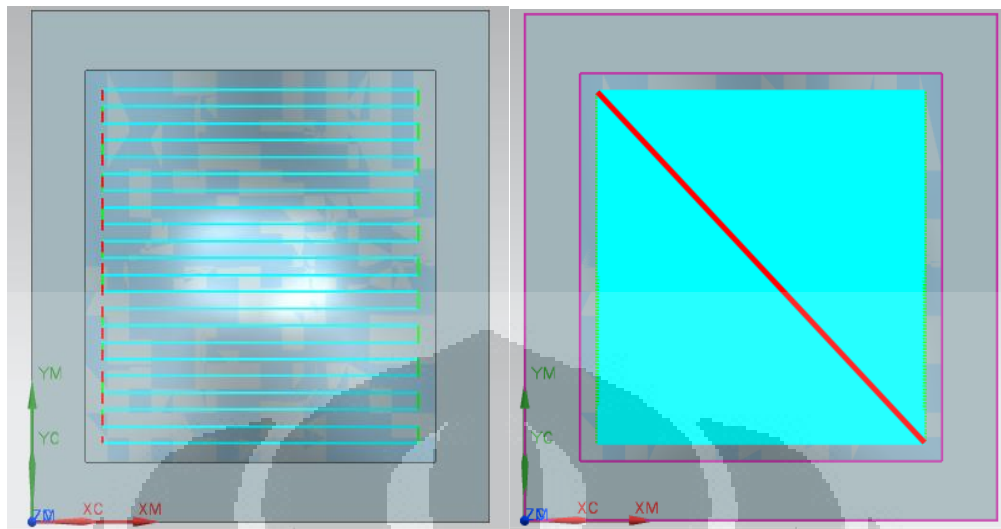
- a. *Female sculptured mold*

Tabel 3.9 Cutting parameter pada Cavity mill-Roughing

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	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.025	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

Gambar 3.12 *Roughing tool path*Tabel 3.10 *Cutting parameter pada Contour area Semi- Finishing*

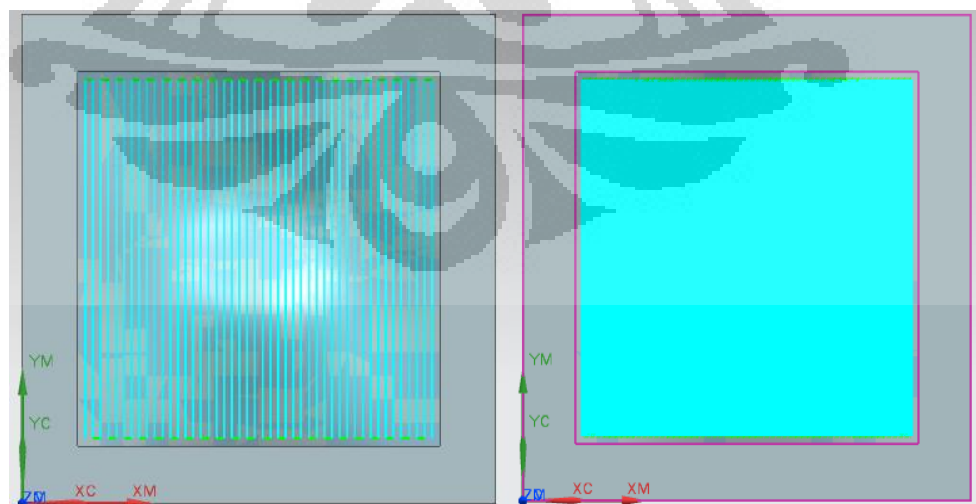
Semi-finishing operation			
Contour area			
Tool flat end mill 0.2 mm			
Area milling drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm
Multi depths	4 layers		



Gambar 3.13 Semi finishing tool path

Tabel 3.11 Cutting parameter pada Contour area Finishing

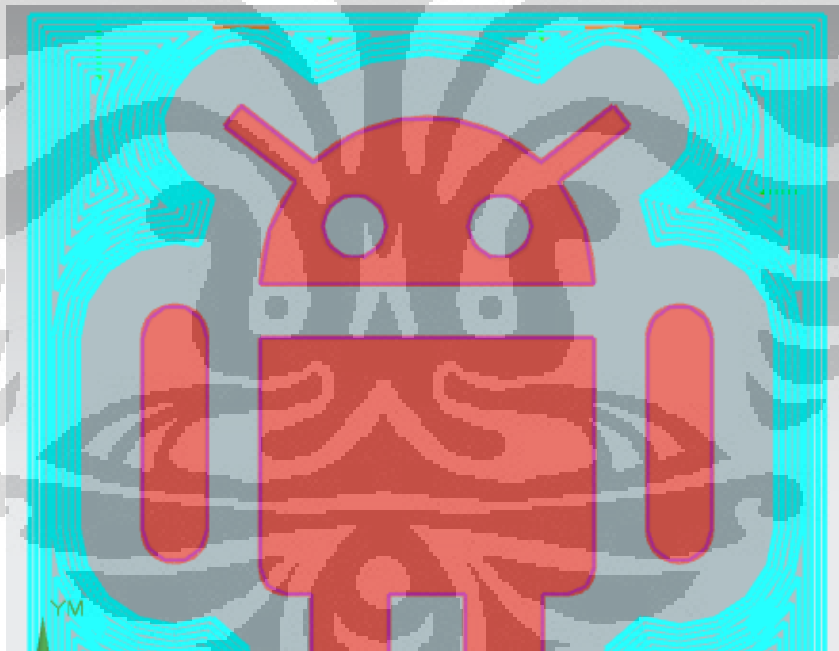
Finishing operation			
Contour area			
Tool ball-nose end mill 0.1 mm			
Surface area drive method			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 200% tool
Depth per cut	0.0125	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.001	Final retract	same as retract
outol	0.001	Clearance	1mm
Multi depths	no		



Gambar 3.14 Finishing tool path (aktual dan simplifikasi)

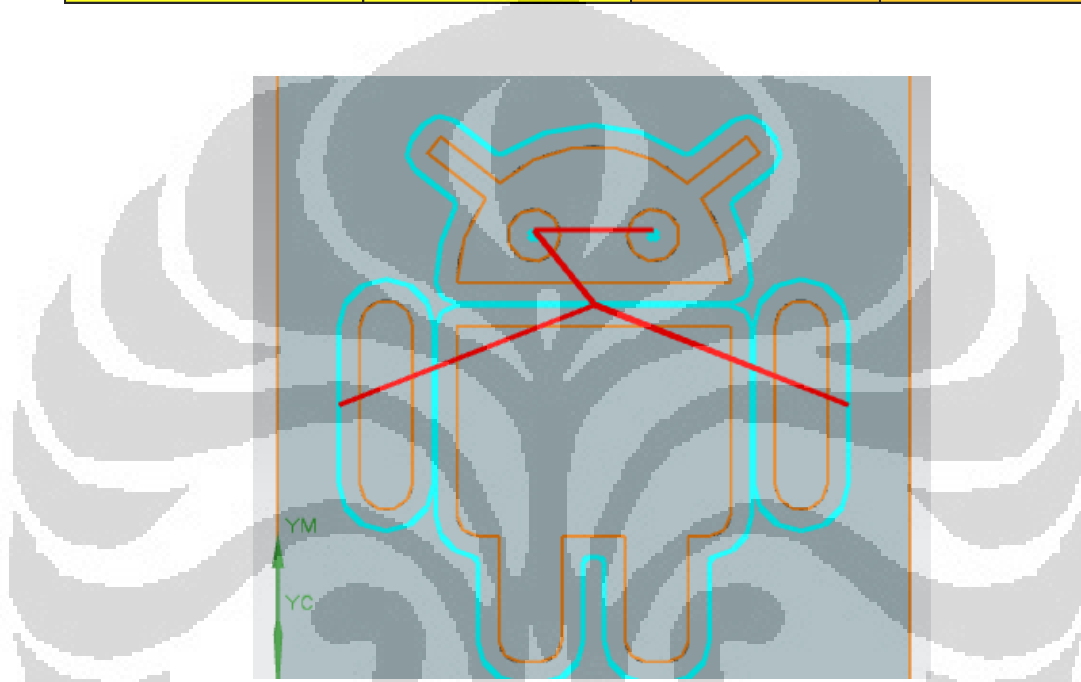
b. Android logo *male*Tabel 3.12 *Cutting parameter pada Face milling area Roughing*

Roughing operation			
Face Milling Area			
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 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	0.02	Final retract	same as retract
outol	0.02	Clearance	1mm
Finish passes added	5% tool dia stepover		

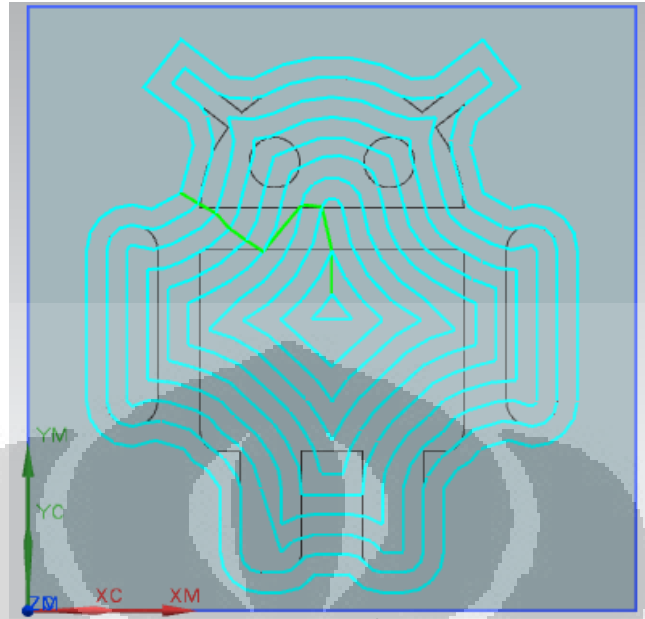
Gambar 3.15 *Roughing tool path*

Tabel 3.13 *Cutting parameter pada Face milling area Roughing (profiling)*

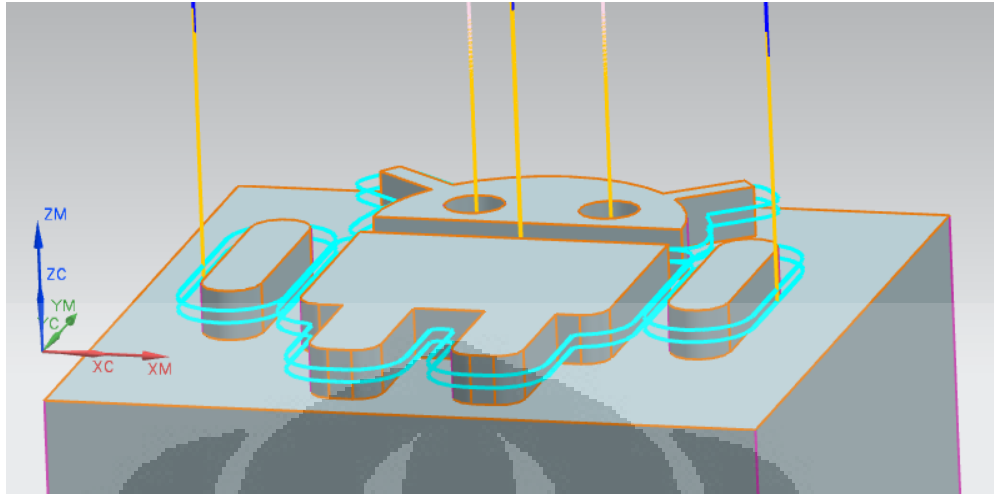
Face Milling Area 2 (profiling)			
Climb milling Tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves (mm)		Non-cutting moves	
Part final stock	0	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.01	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as retract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

Gambar 3.16 *Profiling tool path*Tabel 3.14 *Cutting parameter pada face Milling Area Finishing*

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

Gambar 3.17 Face cleaning *tool path*Tabel 3.15 *Cutting parameter pada face milling area Finishing*

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	Plunge 200% 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

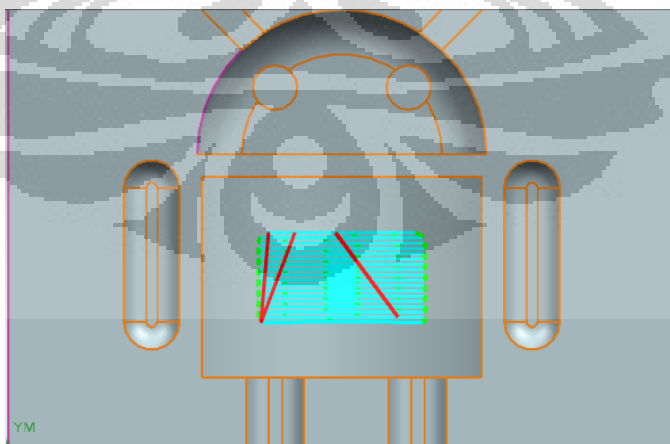


Gambar 3.18 Deburring tool path

c. Android logo Female

Tabel 3.16 Cutting parameter pada Cavity mill Roughing (badan)

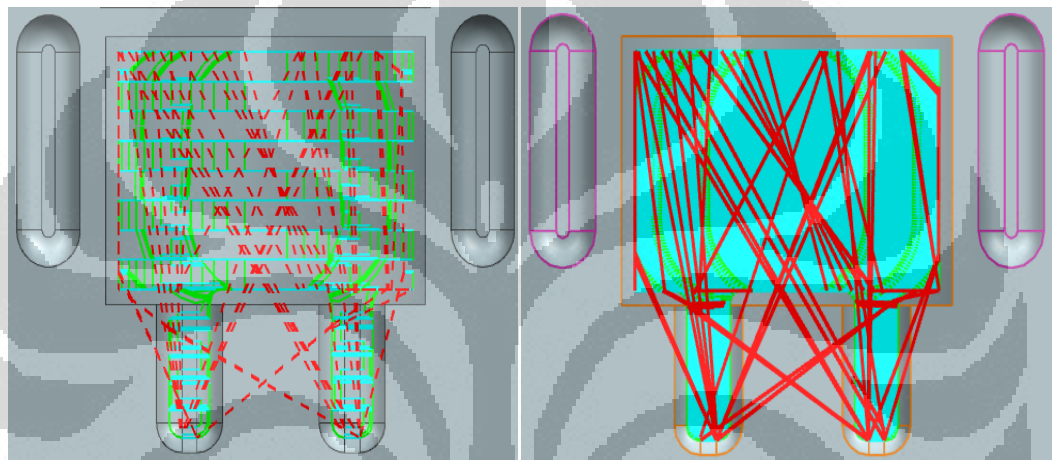
Roughing operation (Badan)			
Cavity mill			
Tool flat end mill 0.5 mm			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 0.5 mm
Depth per cut	0.1	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.025	Retract	same as engage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



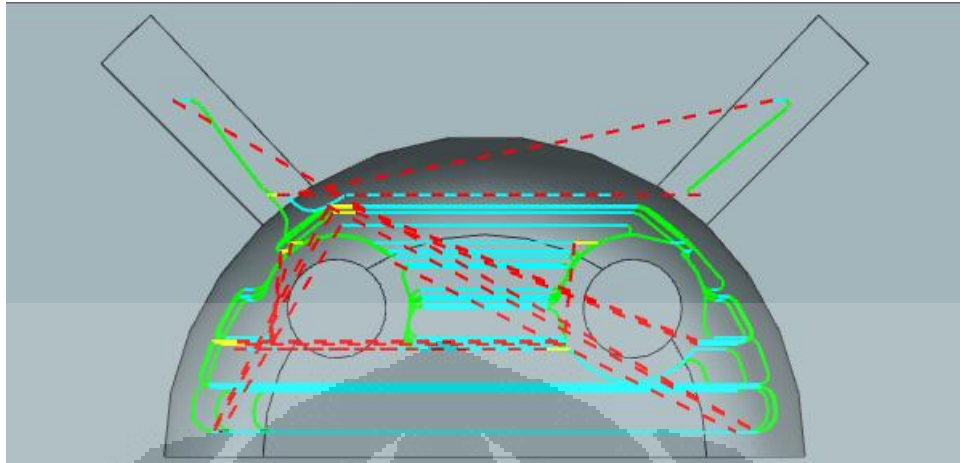
Gambar 3.19 Roughing bagian badan

Tabel 3.17 *Cutting parameter pada Rest milling Semi finishing*

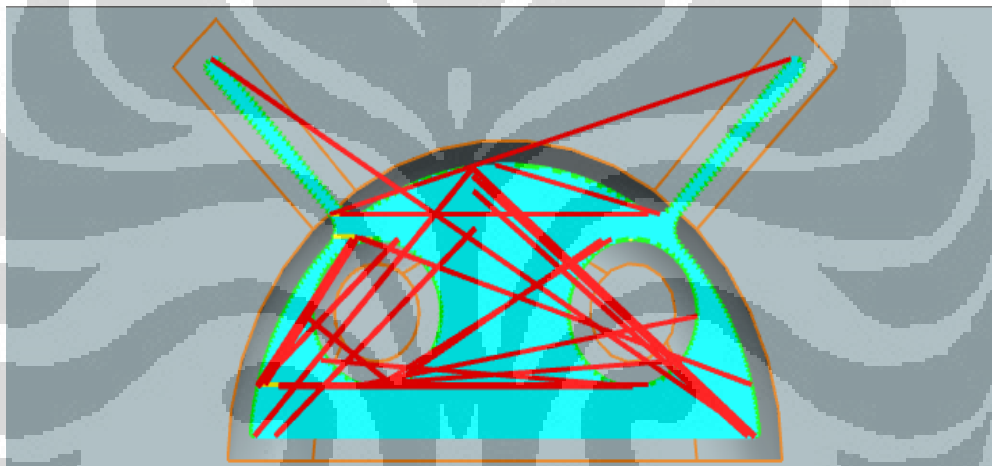
Semi-finishing operation (Badan)			
Rest Milling			
ball nose end mill 0.1 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.01	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.02	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.005	Retract	same as engage
intol	0.01	Final retract	same as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

Gambar 3.20 *Rest milling* bagian badan (simplifikasi dan aktual)Tabel 3.18 *Cutting parameter pada Cavity mill Roughing (kepala)*

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



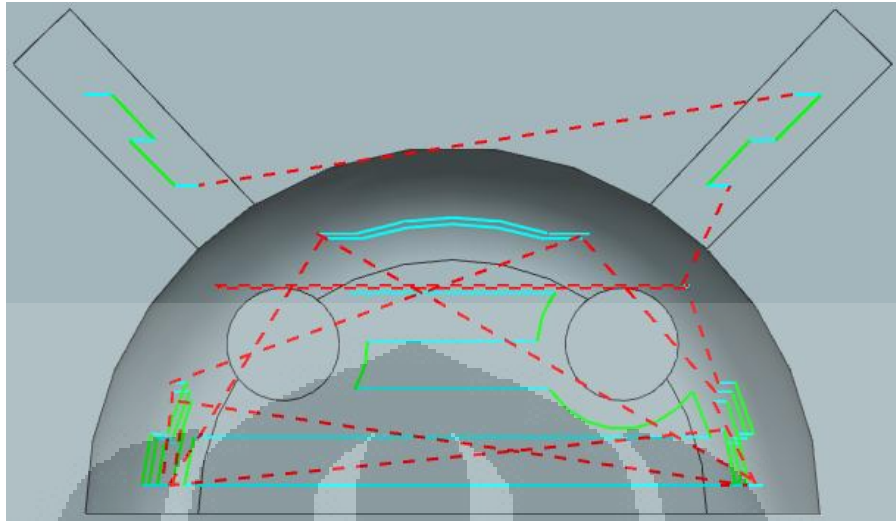
Gambar 3.21 *Roughing tool path* bagian kepala (simplifikasi)



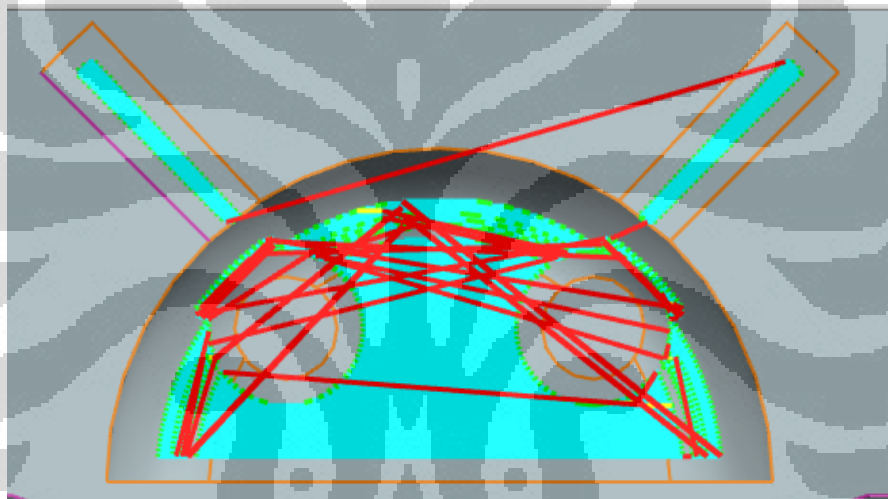
Gambar 3.22 *Roughing tool path* bagian kepala (aktual)

Tabel 3.19 *Cutting parameter* pada *Rest milling Semi finishing* (kepala)

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



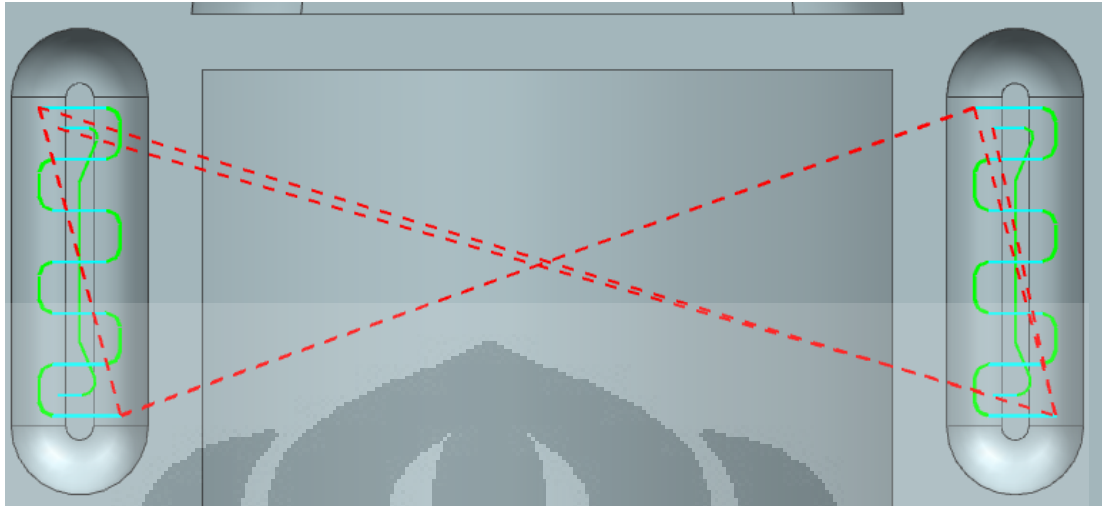
Gambar 3.23 Rest mill tool path bagian kepala (simplifikasi)



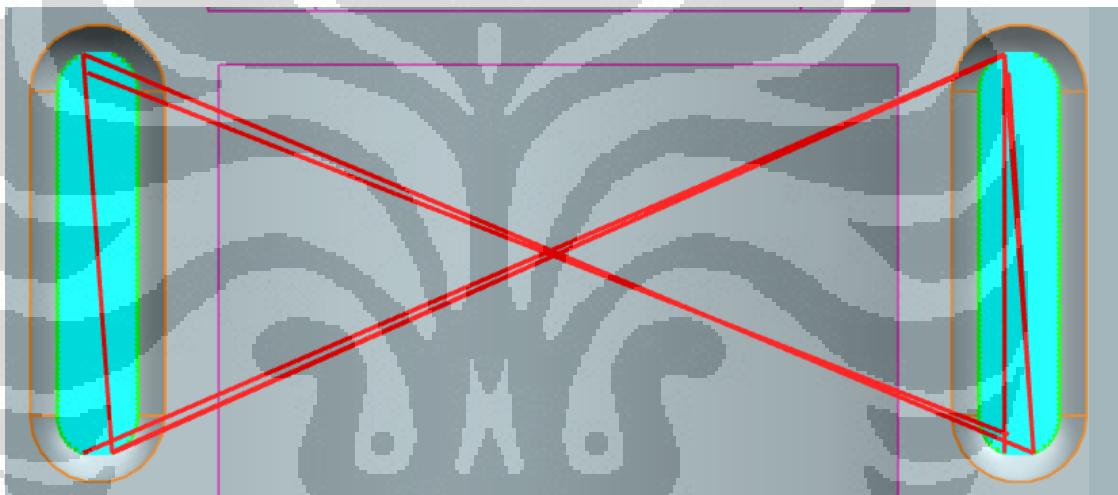
Gambar 3.24 Rest mill tool path bagian kepala (aktual)

Tabel 3.20 Cutting parameter pada Rest milling Roughing (tangan)

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



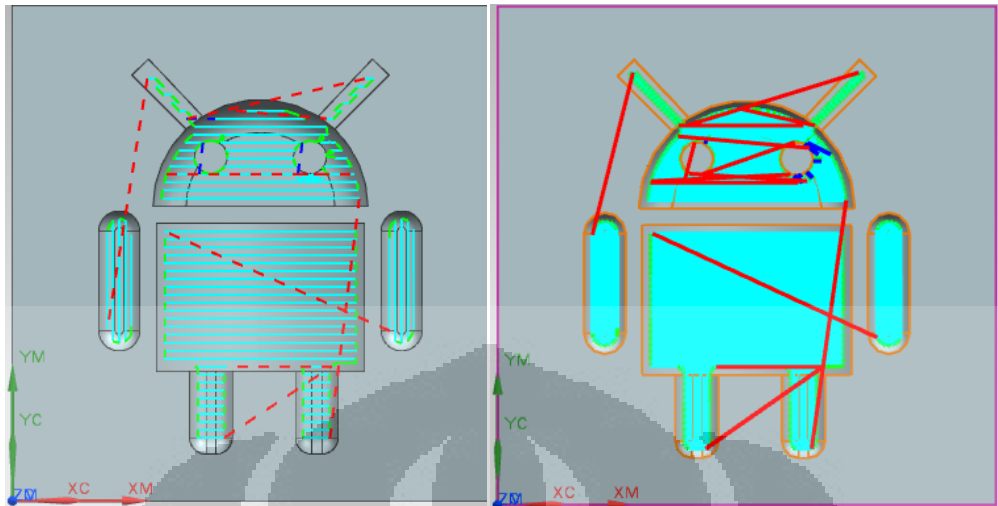
Gambar 3.25 Rest milltool path bagian tangan (simplifikasi)



Gambar 3.26 Rest milltool path bagian tangan (aktual)

Tabel 3.21 Cutting parameter pada Contour area Finishing (seluruh bagian)

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



Gambar 3.27 *tool path finishing* seluruh bagian (simplifikasi dan aktual)

3.3. NC-File Generation dan proses pemesinan *micro-milling*

1.2.1. NC-File Generation

Tahapan selanjutnya dalam proses manufaktur cetakan mikro ini adalah mengubah CL-File menjadi NC-File. Proses ini bertujuan untuk mengubah atau mengkonversi nilai-nilai *cutter location point* yang terdapat dalam CL-file yang berorientasikan *workpiece coordinate system* menjadi nilai *cutter location point* yang berbasis *machine coordinate system*. Hal ini menjadi sebuah proses yang penting karena mesin CNC tidak mengenali sistem koordinat dari benda kerja, melainkan sistem koordinatnya sendiri yaitu sistem koordinat mesin. Oleh karena itu, diperlukan kompensasi terhadap nilai-nilai *cutter location* yang didapatkan dari *tool path* dengan nilai yang menjadi acuan (*machine coordinate system*). Oleh karena itu, penting bagi sistem kerja mesin CNC untuk sepakat dimana nilai *origin* atau nilai 0, 0, 0 benda kerja terhadap mesin. Titik tersebut harus merupakan titik yang sama ketika nilai *origin* benda kerja ditetapkan dalam sistem CAM. Jika titik *origin* benda kerja di mesin dan di dalam sistem CAM sudah sesuai, yang perlu dilakukan kemudian adalah kompensasi nilai dari *cutter location* hasil *tool path generation* dengan jarak *origin* benda kerja terhadap sistem koordinat mesin.

```

TOOL PATH/CAVITY_MILL,TOOL,MILL_1
TLDATA/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 3.28 Contoh CL-File

```

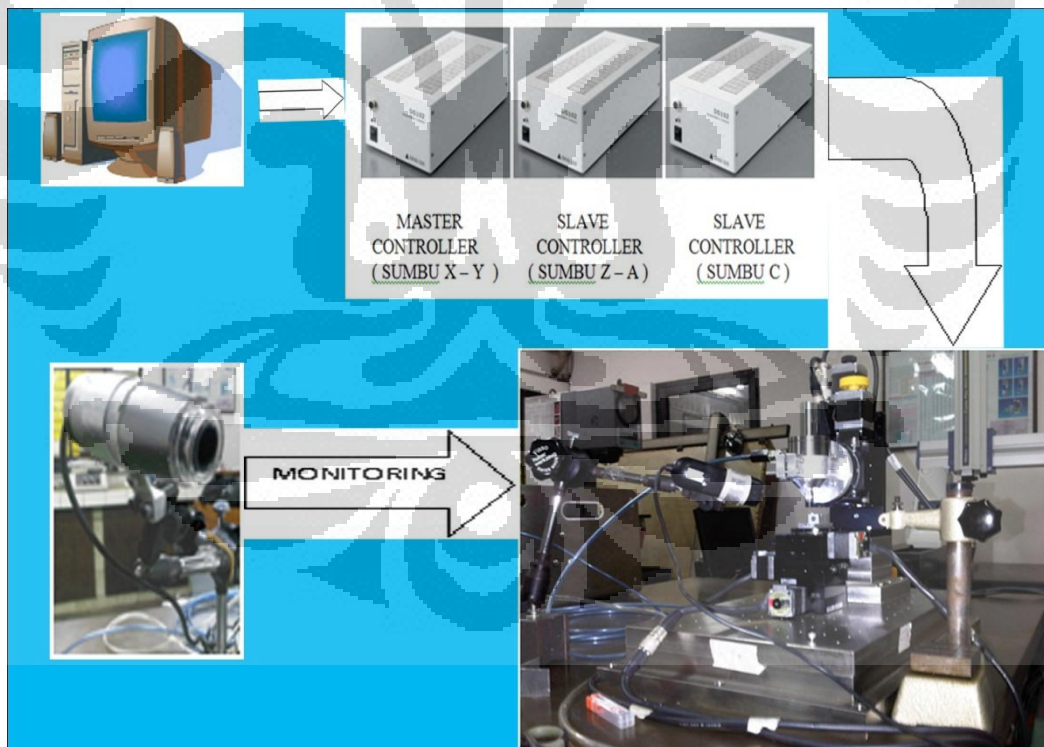
1,AXI1:SELSP 4:F4 1000
2,AXI2:SELSP 4:F4 1000
3,AXI3:SELSP 4:F4 1000
4,GOLA X-3.4165 Y2.5704 Z2.81
5,GOLA X-3.4165 Y2.5704 Z3.405
6,GOLA X-3.4165 Y3.2296 Z3.405
7,GOLA X-3.4165 Y3.2297 Z3.405
8,GOLA X-3.4318 Y3.2653 Z3.405
9,GOLA X-3.4402 Y3.2617 Z3.405
10,GOLA X-3.4402 Y2.5358 Z3.405
11,GOLA X-3.4482 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 3.29 Contoh NC-File

1.2.2. CNC Machine tool

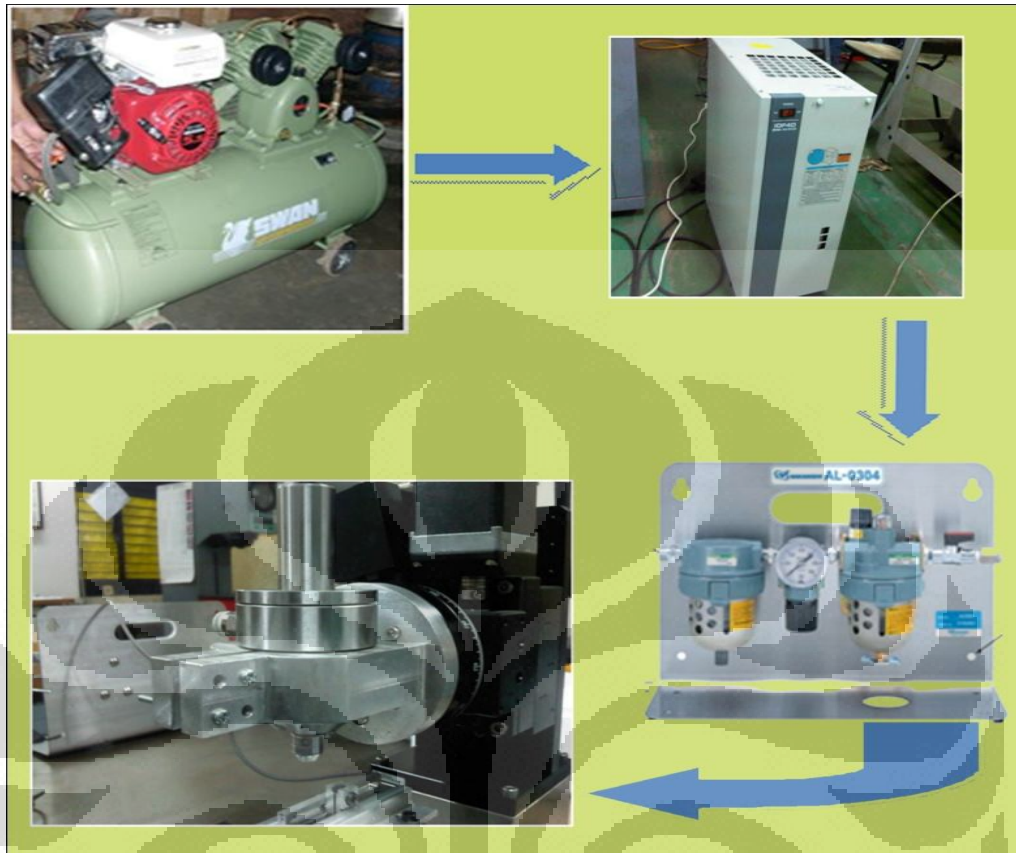
Dalam bagian ini akan dijelaskan mengenai spesifikasi *machine tool* yang digunakan, alur kerja mesin, dan juga kendala-kendala yang ditemukan selama penelitian berlangsung. Mesin *milling* yang digunakan yaitu mesin CNC 5 axis dengan pergerakan terhadap sumbu X, Y, Z dan dua sumbu rotasi di sumbu x dan sumbu z (atau sumbu a dan c). Namun dalam penelitian kali ini, pemesinan *sculptured surface mold* dilakukan dengan menggunakan metode *milling* 3 axis, salah satu tujuannya adalah untuk mempelajari kapabilitas pemesinan 3 axis terhadap *sculptured surface* yang mempunyai tingkat kesulitan yang cukup tinggi untuk dilakukan tanpa dua sumbu rotasi a dan c. Pergerakan 3 axis yang dilakukan berasal dari pergerakan tiga *motorized linear stages* yang masing-masing stage dimotori oleh *motor stepper*.



Gambar 3.30 Alur kerja kontrol motor penggerak

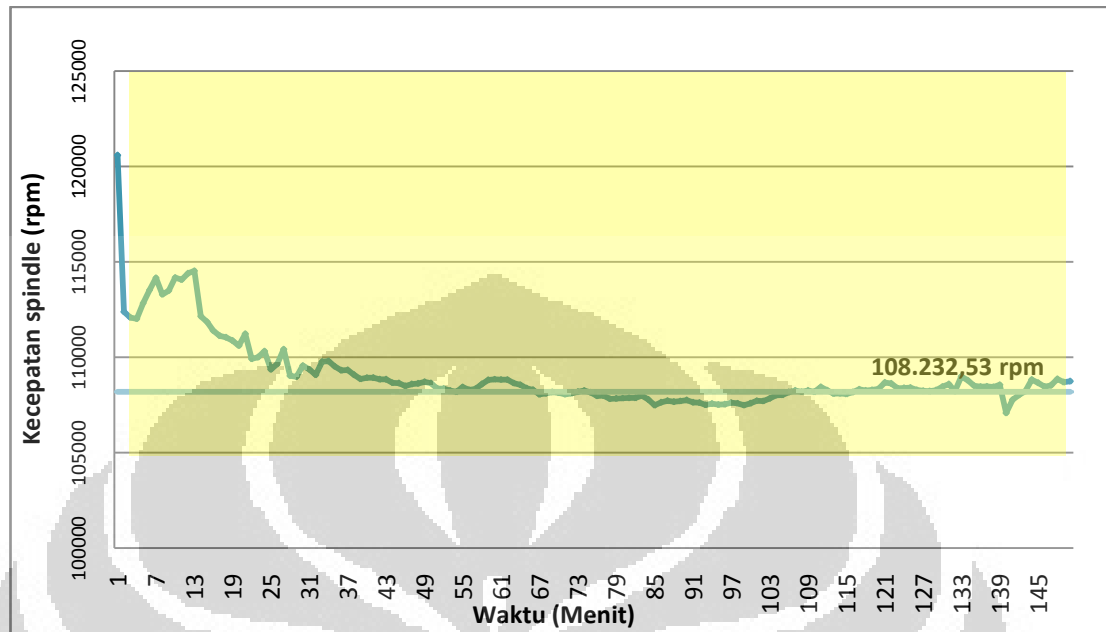
Motor-motor stepper tersebut dikendalikan atau dikontrol oleh *Suruga Seiki DS102MS motor stepper controller*. Sejumlah tiga buah kontroler yang diperlukan untuk mengontrol pergerakan kelima motor dimana masing-masing kontroler dapat mengontrol maksimal 2 buah motor stepper. Terdapat dua *software* interface untuk berkomunikasi dengan motor stepper controller, yang pertama adalah *software* bawaan dari *manufacturer* yaitu DS control win dimana berfungsi sebagai *parameter setter*, dan yang kedua adalah *software micro machining communication command software* yang merupakan pengembangan algoritma dasar yang disediakan oleh *manufacturer* untuk keperluan komunikasi yang lebih *sturdy* dan *robust*. *Motor stepper* dan kontrolernya masing-masing mampu menggunakan mode *microstepping* yang artinya setiap pulsa yang diberikan kepada motor dapat mencapai *step angle* maksimum sampai 0.00288° pergerakan per pulsa yang diberikan atau $1/250$ kali dari *step angle* normal (0.72°). Namun resolusi yang dipergunakan dalam pemesinan yaitu sebesar $0.5 \mu\text{m}$ untuk semua axis kecuali sumbu z yang mempunyai resolusi lebih kecil yaitu $0.05 \mu\text{m}$ untuk mengurangi resiko pemakanan yang terlalu dalam (*over depth per cut*). Proses pemotongan dilakukan dengan cara men-download program NC-File kedalam kontroler untuk kemudian menggerakkan *motor stepper* masing-masing sumbu. Setiap *motor stepper* bertanggung jawab untuk pergerakan setiap sumbu, dimana kombinasi dari pergerakan tiga motor yang terinterpolasi akan melakukan pemotongan 3 axis.

Proses *milling* yang dilakukan dalam penelitian ini memerlukan *spindle* yang berputar dengan kecepatan yang sangat tinggi, hal ini dikarenakan kebutuhan dari proses operasi skala mikro. *Cutting tool* dengan diameter yang lebih kecil memerlukan *speed* yang lebih tinggi, baik itu *spindle* ataupun *cutting speed* dan juga rotasi yang halus (tanpa getaran dan noise) agar dapat mencapai performa yang baik. *Spindle* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *air turbine spindle* HTS1501S-M2040 dengan kecepatan maksimum sampai 150000 RPM memanfaatkan *compressor* untuk suplai udara bertekannya. Kebutuhan akan suplai udara bertekanan yang kering disediakan oleh dua tahap penyaringan (2 *stages filtering/and drying*). Tahap pertama adalah penggunaan *air dryer* dan tahap ke dua adalah dengan menggunakan perangkat *air line kit* AL-0304.



Gambar 3.31 Alur kerja penggerak *spindle*

Untuk mengetahui karakteristik dari *spindle*, dilakukan pengujian kecepatan *spindle* dengan suplai udara bertekanan tertentu dari kompresor. 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. Hasil pengukuran kecepatan *spindle* seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 3.32 Grafik karakteristik *spindle*

Keterangan :

■ : Kondisi saat kompresor beroperasi

Kecepatan operasi *spindle* menjadi nilai acuan yang dipakai dalam penentuan *cutting* parameter. Parameter yang ditentukan berdasarkan nilai *spindle* ini diambil dari rekomendasi perusahaan pembuat *cutting tool*. Berikut adalah perhitungan dari penentuan *cutting* parameter yang dipakai.

1. Perhitungan feed rate

Untuk pemesinan *material steel* dan alumunium yang dipakai dalam penelitian ini, berdasarkan table *cutting tool* SECO (*tool's manufacturer*), didapatkan nilai rekomendasi RPM, feed per tooth, dan feed rate sebagai berikut.

Tabel 3.22 *Cutting parameter* rekomendasi

	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*:
 - $0.085 \times 5,095 \text{ mm/men} = 433.075 \text{ mm/men} = 7.218 \text{ mm/ sec}$
 - 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 $0.6 \times$ diameter *cutting tool*, sedangkan besarnya nilai *step over* sebesar $0.05 \times$ 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 :

- $Depth \text{ per cut} = 0.6 \times 0.1 \text{ mm} = 0.06 \text{ mm} = 60 \mu\text{m}$
- $Step \text{ over} = 0.05 \times 0.1 \text{ mm} = 0.005 \text{ mm} = 5 \mu\text{m}$

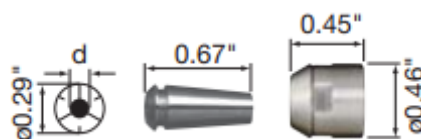
- Sehingga besarnya *depth per cut* dan *step over* yang dapat digunakan sebesar 0.06 mm dan 0.005 mm. kurang dari nilai tersebut masih dikatakan aman untuk digunakan pada proses pemesinan.

Pergerakan motor stepper dilanjutkan dengan menggerakkan stage-stage atau panggung yang menjadi fondasi untuk pergerakan table maupun head (*spindle*). Stage-stage tersebut disebut juga motorized stage dan dalam mesin yang dipakai di penelitian ini, terdapat 3 buah stage yang bersamaan mengatur pergerakan pemakanan.



Gambar 3.33 Motorized stages [23]

Di ujung *spindle*, terdapat sebuah komponen yang berfungsi untuk memegang dan menjaga *Cutting tool* tetap kuat diposisinya selama perputarannya. Komponen tersebut adalah collet. Terdapat dua jenis collet yang digunakan; 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*



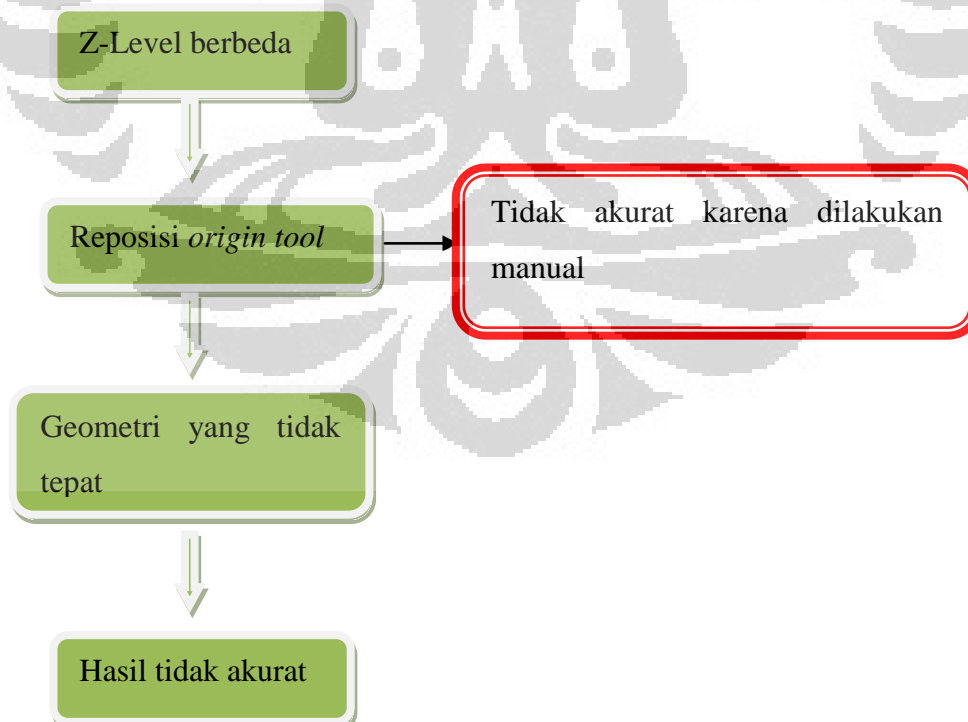
CAT. No.	Model	Inside Diameter d
RA11813	CHA-3.0	ø3.0
RA11819	CHA-4.0	ø4.0

Gambar 3.34 Collet Cutting tool [24]

Selama penelitian berlangsung, ditemukan beberapa kendala yang cukup menghambat, antara lain adalah :

a. Penentuan *level Z* dari *cutting tool*

Ketika serangkaian proses pemesinan diperlukan dalam mengerjakan suatu produk, seringkali diperlukan pergantian *cutting tool*. Hal tersebut menuntut suatu sistem mekanisme pergantian pahat yang *robust* karena ketika pergantian pahat dilakukan, sangat mungkin terjadi perubahan posisi dari pahat yang mana membuat NC –File harus kembali menyesuaikan dengan nilai *z* dari pahat. Dalam penelitian ini, hal tersebut menjadi kendala yang cukup merepotkan karena eror yang dihasilkan sangat berdampak kepada proses dan hasil pemesinan.



Gambar 3.35 Alur terjadinya eror akibat z-level yang berubah-ubah

b. *Cutting* fluid

Cutting fluid merupakan salah satu elemen yang penting dalam proses pemesinan. Selain berfungsi menurunkan temperature kerja yang cukup tinggi karena gesekan antara *tool* dan benda kerja, *cutting* fluid berguna untuk membantu menyingkirkan geram (*chip*) yang dihasilkan. Pendingin dan penyingkiran geram merupakan dua hal yang sangat mempengaruhi proses pemesinan, umur pahat dan hasil permukaan pemesinan.

c. *Post processor* dan komunikasi PC-kontroler

Post processor yang merupakan converter CL-file menjadi NC-File, merupakan jembatan antara sistem CAM dengan *machine tool*. Namun, pembuatan NC-File lewat *post processor* yang dipakai dalam penelitian ini masih menunjukkan ketidakpraktisan dalam penggunaannya. Lebih dikehendaki jika formula *post processor* untuk *machine tool* yang dipakai sudah embedded di dalam sistem CAM. Selain itu, komunikasi antara PC dengan kontroler motor stepper yang belum robust masih menjadi kendala yang cukup menghambat. Lebih lanjut, integrasi postprocessor dengan komunikasi kontroler pun dapat dilakukan sehingga operasi pemesinan dapat dilakukan dengan lebih otomatis.

BAB 4

ANALISA PROSES DAN HASIL DALAM PEMESINAN *MICROMOLD*

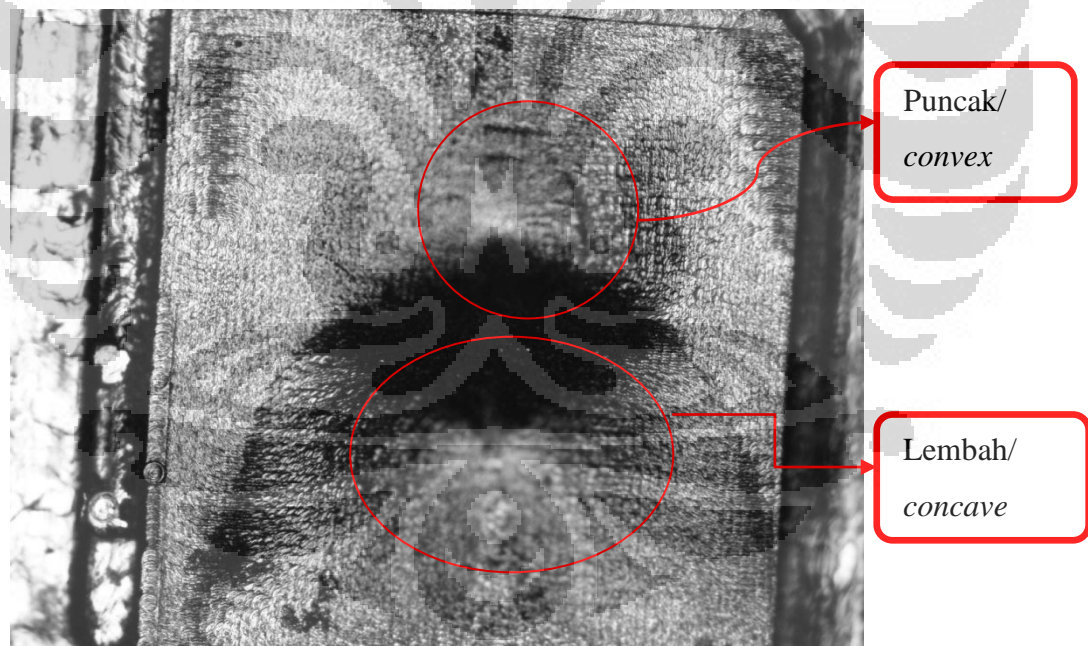
Proses manufaktur yang dikerjakan dalam penelitian ini dilakukan sampai kepada tahap pengamatan/pemeriksaan hasil pemesinan cetakan mikro. Seperti dijelaskan sebelumnya, dalam penelitian ini dilakukan pengerjaan pemesinan cetakan mikro pada beberapa model cetakan, namun dari kesemuanya itu, yang menjadi objek dari pokok atau fokus penelitian adalah model *sculptured surface male mold* dimana akan dibahas pada bab berikutnya. Pada pembahasan dalam bab ini, akan dijelaskan mengenai beberapa fenomena yang terjadi selama penelitian, baik saat pemesinan model *sculptured surface male mold* maupun saat pemesinan model-model lain yang dikerjakan. Aspek-aspek yang diteliti lebih lanjut dari hasil pemesinan meliputi: kesesuaian hasil pemesinan dengan profil permukaan desain, kualitas permukaan hasil pemesinan dan *burr formation* atau *uncut chip* yang terbentuk, serta *tool wear* yang terjadi. Adapun model-model cetakan mikro lain selain *sculptured surface male mold* yang telah dikerjakan adalah *sculptured surface female mold*, *Android's logo male* dan *android's logo female*. Dalam pembahasan pada bagian ini akan ditampilkan hasil-hasil pemesinan dari model-model tersebut secara *brief* namun komprehensif.

4.1 Kesesuaian hasil pemesinan dengan profil permukaan desain

Kesesuaian yang dimaksud disini adalah perbandingan ketepatan geometri hasil pemesinan dengan geometri model yang dirancang. Model 3D yang didesain pada awal proses manufaktur tentunya dibuat dengan spesifikasi yang memuat fungsi-fungsi dan tujuan dari pembuatan produk tersebut. Oleh karena itu, ketepatan dan kesesuaian geometri hasil pemesinan tidak boleh malah menghilangkan fungsi-fungsi produk jadi karena tidak seperti yang diharapkan. Berbicara soal kesesuaian tidak akan lepas dari toleransi dan akurasi pemesinan, namun pada sub bahasan ini baru akan dibahas kesesuaian secara visual lewat bantuan alat-alat ukur optik yang mempunyai perbesaran yang besar dan baik untuk mendapat visualisasi yang jelas. Penggunaan *microscope* dan SEM

merupakan metode yang dipakai di dalam penelitian ini untuk meneliti permukaan dan geometri hasil pemesinan lebih lanjut. *Microscope* yang digunakan adalah *microscope* AD4013MTL dino-lite premiere dan AM422X dino-eyepiece dimana *microscope* pertama berfungsi sebagai monitoring instrument sedangkan *microscope* kedua berfungsi sebagai *surface/structure examination*. *Microscope* AM422X dino-eyepiece juga berfungsi menghubungkan *microscope* optik konvensional dengan komputer agar pengamatan dapat dilakukan dengan lebih mudah.

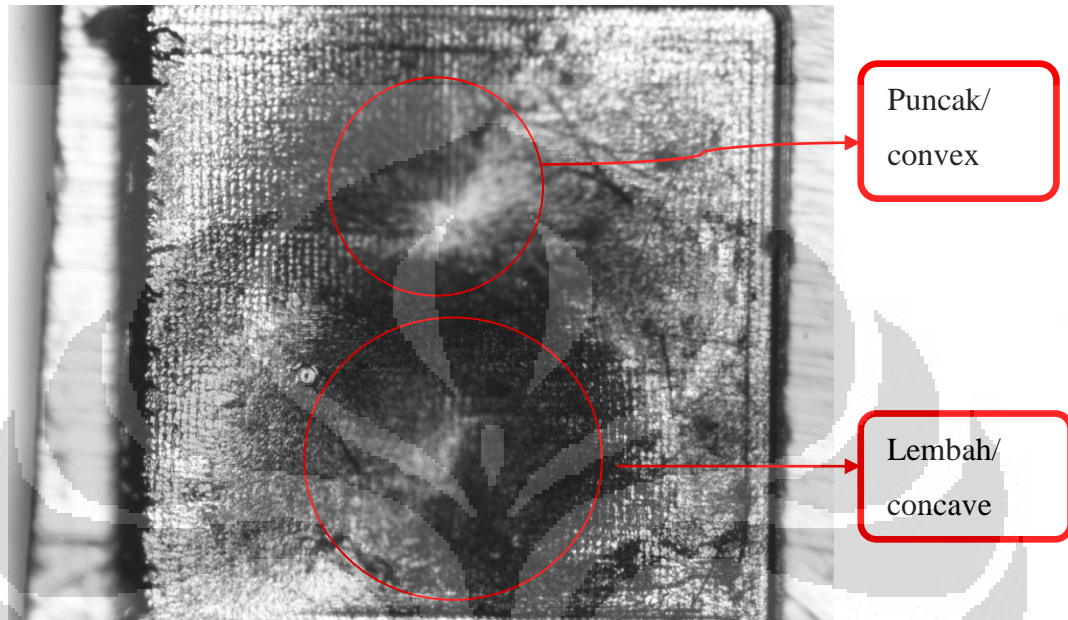
Model pertama, yaitu *sculptured surface male mold* mempunyai hasil pemesinan yang cukup baik, dan secara visual sudah terlihat menyerupai geometri desain. Oleh karena itu hasil pemesinan model ini dinilai cukup baik sebagai model yang difokuskan untuk diteliti lebih lanjut mengenai kesesuaian permukaannya dengan permukaan desain (*machining tolerance and accuracy*).



Gambar 4.1 Geometri hasil pemesinan *sculptured surface male*

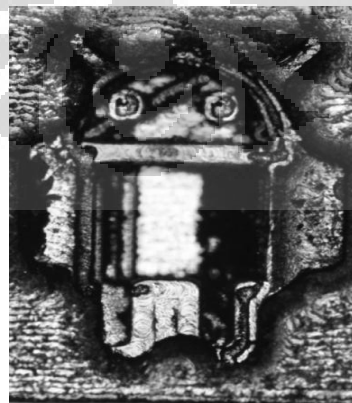
Pasangan dari model pertama sebelumnya adalah *sculptured surface female mold* yang juga memiliki bentuk geometri hasil pemesinan yang cukup

baik walaupun jika diteliti lebih lanjut terdapat banyak kekurangan untuk dievaluasi penyebabnya.



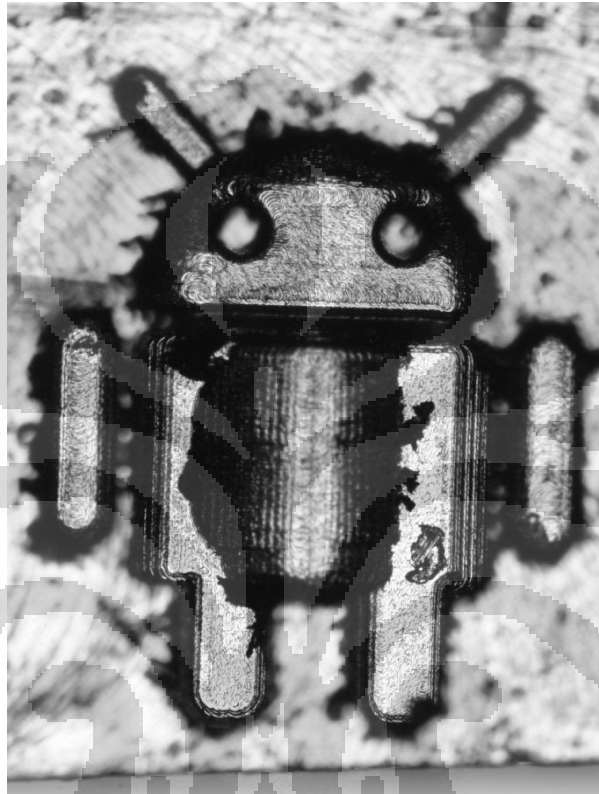
Gambar 4.2 Geometri hasil pemesinan *sculptured female*

Untuk model logo android *male* dapat terlihat bahwa geometri atau profil android yang dimaksud dalam model 3D sudah cukup terwakili oleh geometri hasil pemesinan, namun cacat yang jelas terlihat adalah goresan diagonal yang melintang di bagian kiri kepala logo android *male*.



Gambar 4.3 Geometri hasil pemesinan logo android *male*

Selanjutnya, model terakhir adalah logo android *female*. Pada hasil pemesinannya, dapat dilihat bahwa geometrinya sudah sangat baik, menyerupai model 3D yang dirancang sebelumnya.



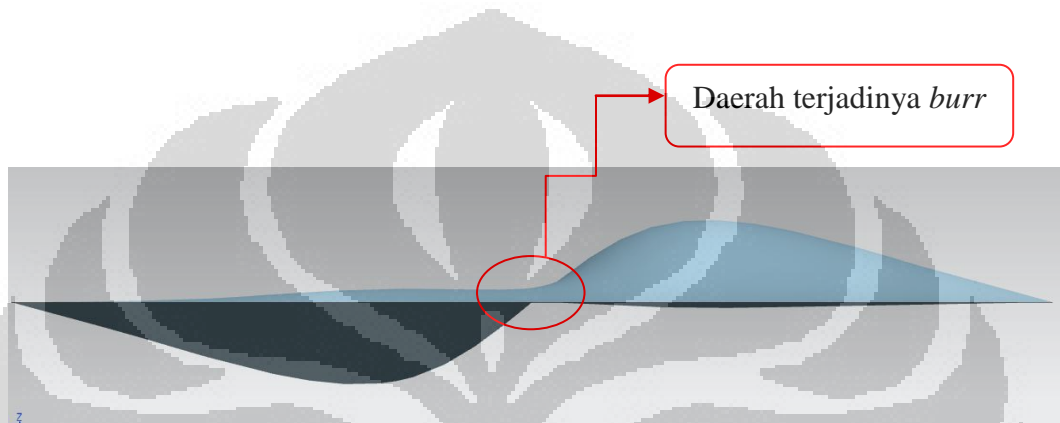
Gambar 4.4 Geometri hasil pemesinan logo android *female*

4.2 Kualitas permukaan dan *burr formation* atau *uncut chip* yang terbentuk

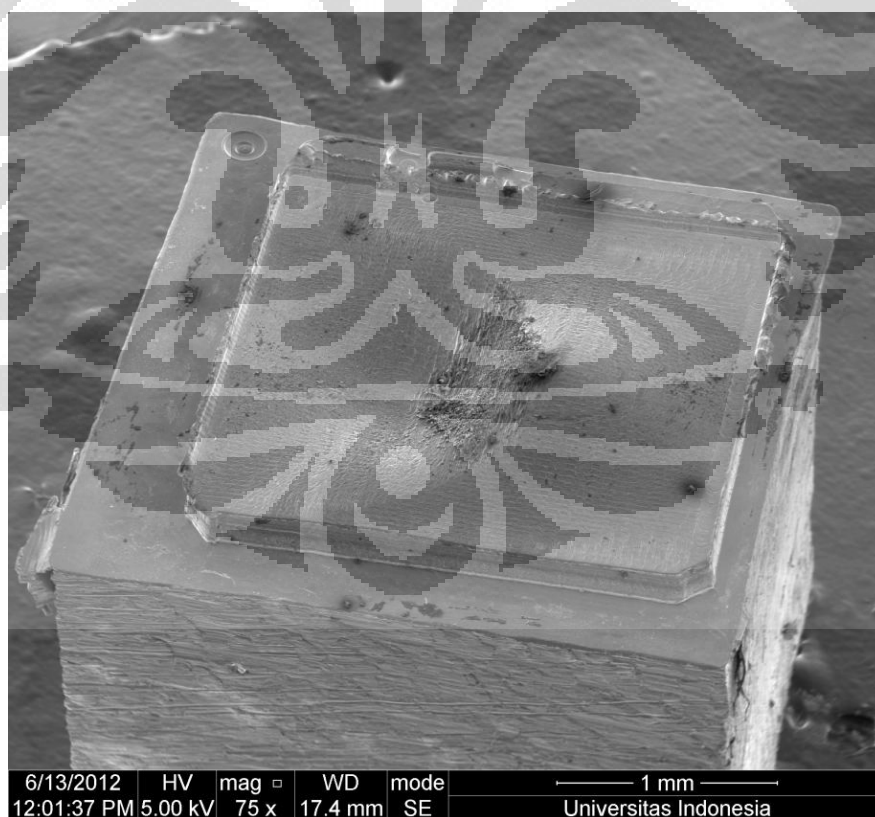
Tujuan dari cetakan adalah untuk membuat produk yang geometrinya diperoleh dari profil geometri cetakannya tersebut. Sangat penting untuk memastikan bahwa permukaan produk mencapai tingkat akhir yang memenuhi spesifikasi yang ditargetkan karena penambahan pekerjaan *surface finishing* akan sangat merugikan dari segi waktu dan biaya produksi. Ekspektasi tersebut membuat tuntutan bagi proses *molding* agar memiliki output yang sudah *net-shape*, atau sudah final. Tentunya spesifikasi tersebut hanya dapat dicapai dengan memiliki kualitas permukaan dari cetakan yang baik. Kualitas permukaan cetakan

sangat menentukan bentuk dari output cetakan itu setelah proses *molding* (*injection molding*).

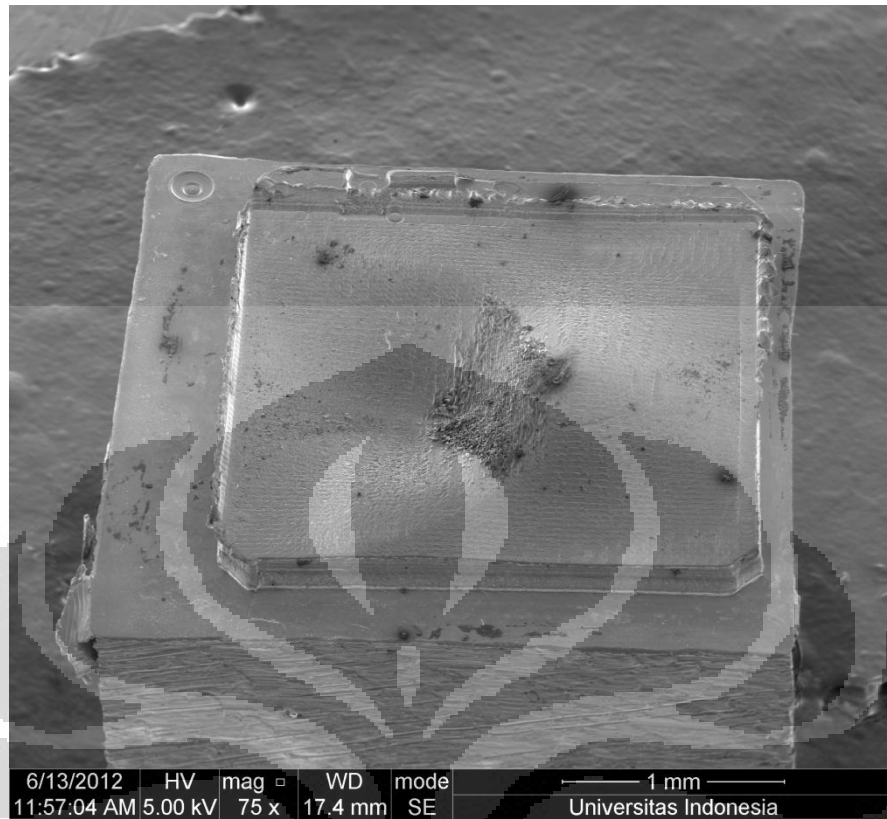
Dalam penelitian ini, ditemukan sebuah fenomena pembentukan *burr* yang terjadi pada proses pemesinan *sculptured male* yang terdapat di bagian tengah dari sampel. Bagian tengah tersebut adalah daerah transisi dari *area concave* (cekung) ke *convex* (puncak) dimana itulah daerah paling curam perubahan ketinggiannya.



Gambar 4.5 *Sculptured surface* [18]



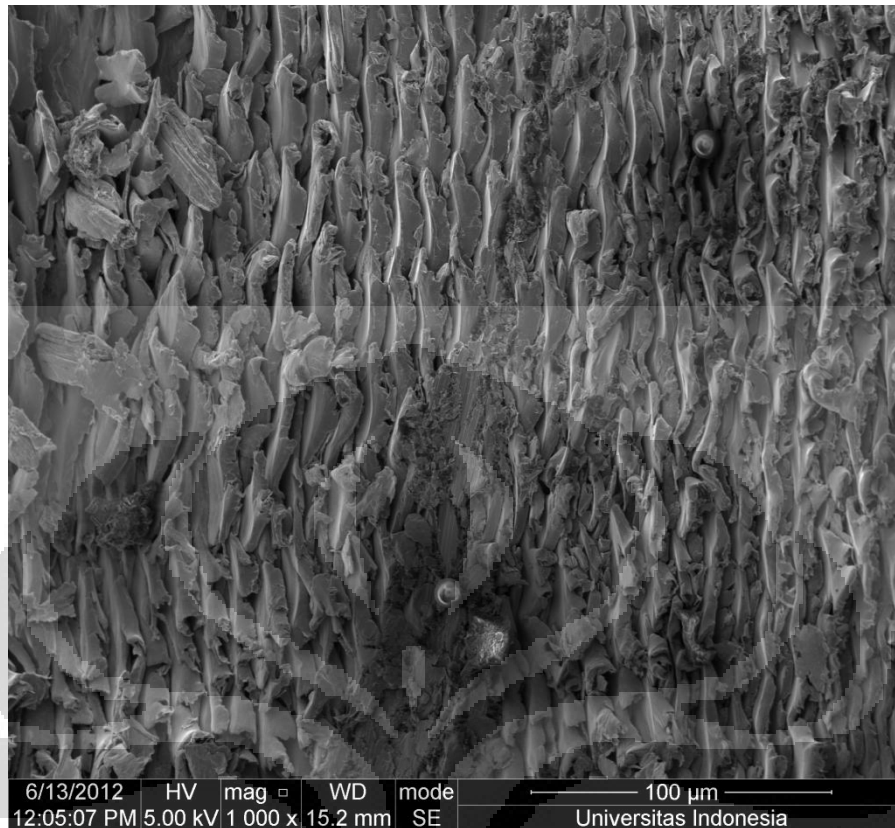
Gambar 4.6 Geometri hasil pemesinan *male sculptured surface*



Gambar 4.7 Geometri hasil pemesinan *male sculptured surface*



Gambar 4.8 *Burr* yang terjadi pada daerah puncak-lembah

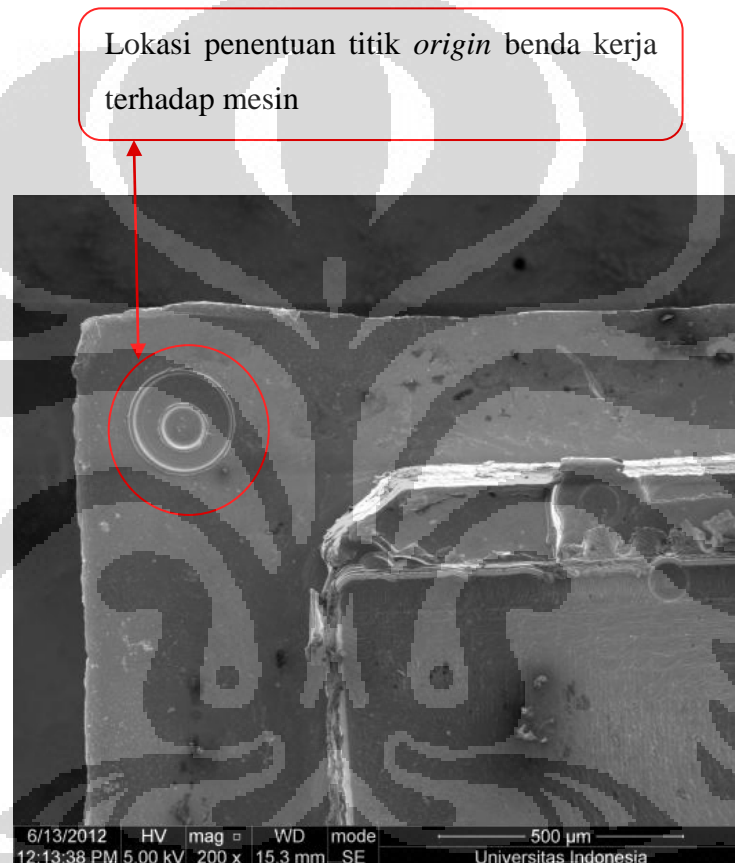


Gambar 4.9 *Burr* pada daerah puncak-lembah

Beberapa hipotesis yang diambil mengenai penyebab terjadinya atau terbentuknya *burr* tersebut adalah:

- *Cutting tool* yang sudah aus (*wear*). Namun hipotesis ini tidak kuat karena *burr* hanya terjadi di satu bagian saja.
- Kurangnya jumlah *cutter* contact point pada daerah tersebut (kurangnya densitas CC-point). Namun hipotesis ini pun dapat disanggah karena nilai *tolerance band* yang mempengaruhi jumlah CC-point diterapkan seragam untuk seluruh bagian permukaan sehingga akan ada banyak *area* yang mungkin disana terbentuk *burr* selain pada daerah tersebut saja.
- Hipotesis ketiga yang dianggap paling kuat adalah penentuan titik 0,0,0 dari benda kerja terhadap mesin berubah ketika dilakukan pergantian *cutting tool*. Perubahan yang terjadi adalah ketidakstabilan nilai z titik 0,0,0 benda kerja terhadap mesin dari nilai awal pada pemakaian pahat pertama dan nilai berikutnya pada pergantian pahat. Perbedaan nilai *origin* tersebut dapat dilihat pada gambar berikutnya. Perbedaan nilai z

yang terjadi diperkirakan adalah titik terakhir (operasi *finishing*) tidak berada sedalam titik pada saat operasi sebelumnya sehingga pada operasi terakhir, terdapat bagian-bagian yang tidak dikerjakan oleh pahat karena kurangnya nilai z. Bentuk-bentuk seperti tangga terlihat seperti hasil dari proses operasi *roughing* yang dijelaskan pada bab sebelumnya.

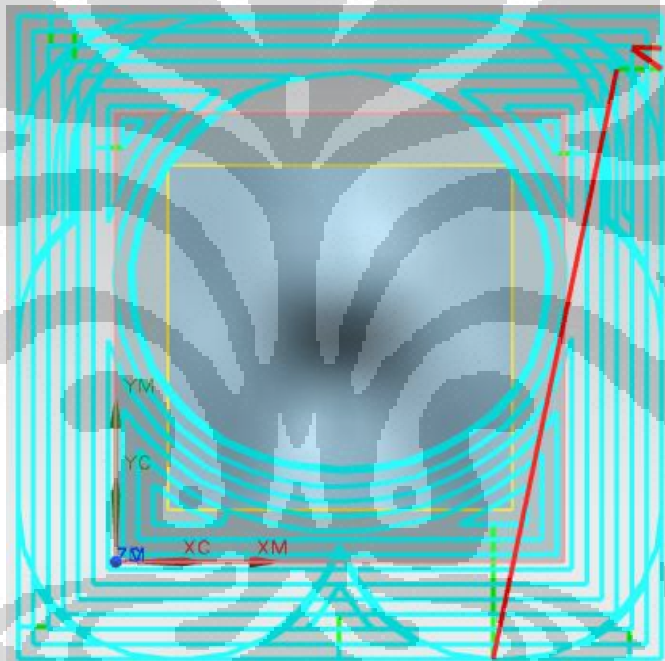


Gambar 4.10 Lokasi penentuan titik *origin*

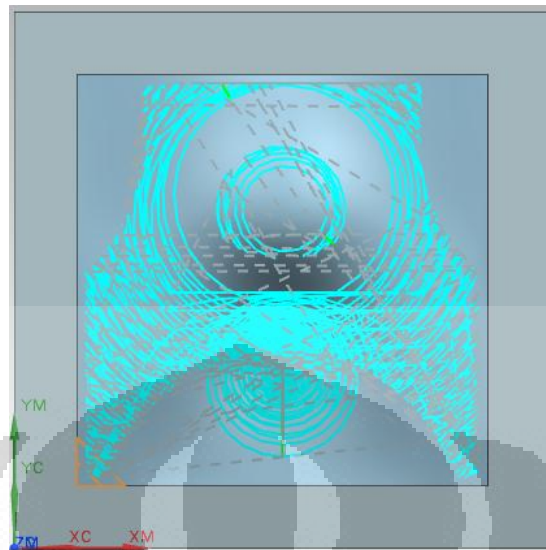
Oleh karena itu, hipotesis yang dianggap sebagai hipotesis terkuat tersebut dalam penelitian ini ditindaklanjuti dengan melakukan percobaan ulang pada geometri sampel yang sama. Percobaan dilakukan dengan sedikit perbedaan parameter, seperti salah satunya adalah ukuran *Cutting tool* yang dipakai saat operasi *roughing* adalah *Cutting tool* berdiameter 2 mm (operasi sebelumnya menggunakan *Cutting tool* 0.5 mm). Berikut adalah proses-proses yang dikerjakan pada percobaan ulang ini.

Tabel 4.1 *Cutting parameter pada operasi Face milling area Roughing*

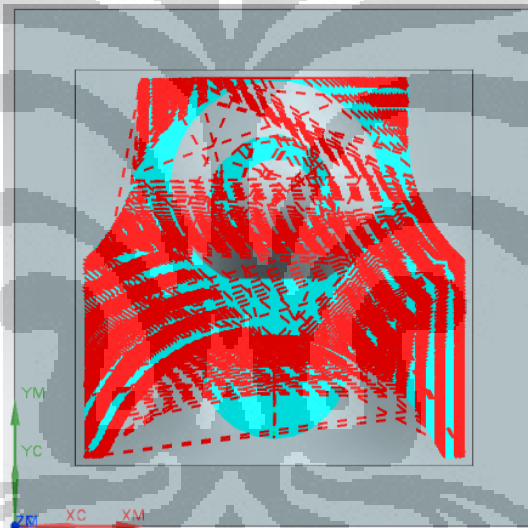
<i>Roughing operation I</i>			
<i>Face milling area</i>			
<i>tool flat end mill 2 mm</i>			
Climb milling Follow periphery cut pattern			
Cutting moves		Non-cutting moves	
<i>Part final stock</i>	0	<i>Engage open area</i>	Plunge 0.5 mm
<i>Depth per cut</i>	0.1 mm	<i>engage closed area</i>	same as open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

Gambar 4.1 *tool path operasi roughing I*Tabel 4.2 *Cutting parameter pada operasi Rest milling Roughing*

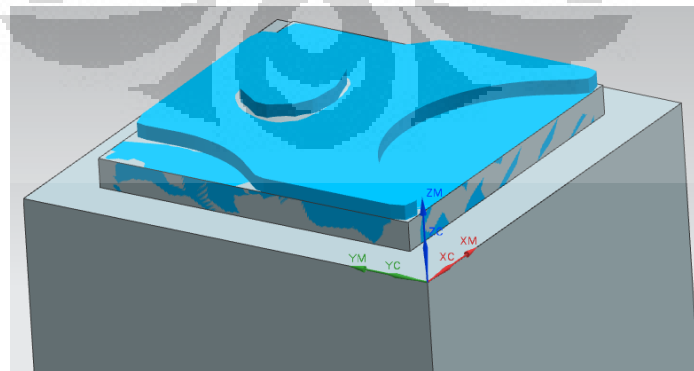
<i>Roughing operation</i>			
<i>Rest milling</i>			
Climb milling tool flat end mill 0.2 mm			
Cutting moves		Non-cutting moves	
<i>Part final stock</i>	0.03 mm	<i>Engage open area</i>	Plunge 0.5 mm
<i>Depth per cut</i>	0.01 mm	<i>engage closed area</i>	same as open area
<i>Width of cut</i>	0.01 mm	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



Gambar 4.12 *tool path Rest milling simplifikasi*



Gambar 4.13 *tool path Rest milling aktual*

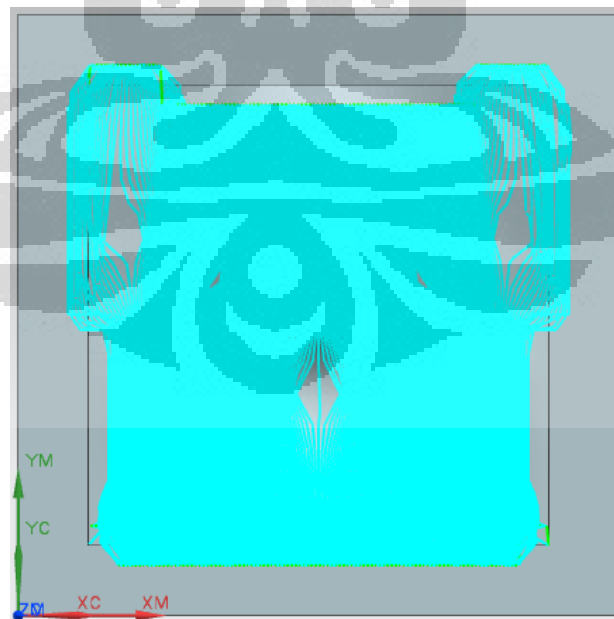


Gambar 4.14 Sisa operasi *roughing I & II*

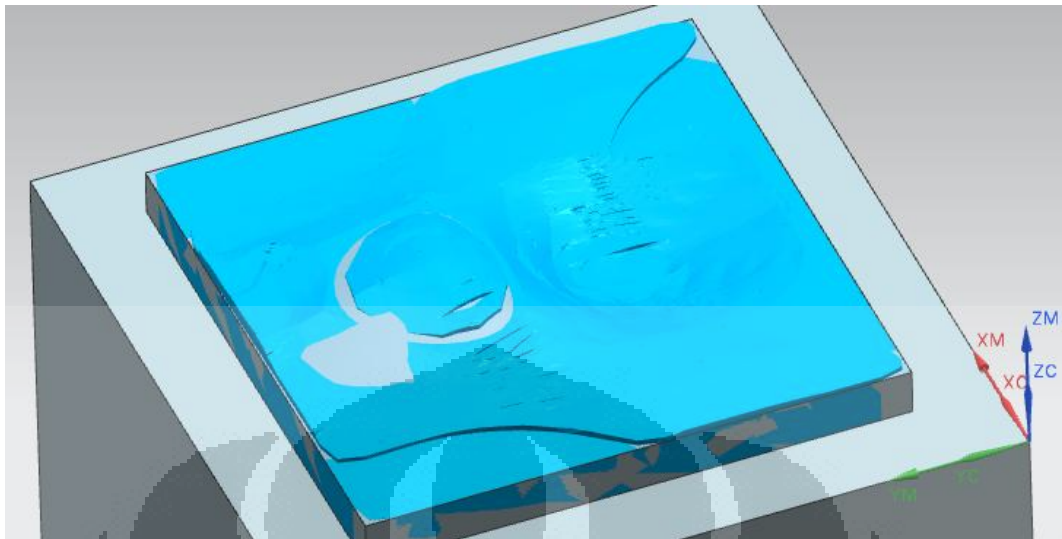
Untuk operasi selanjutnya, yaitu operasi semi-*finishing*, dilakukan dengan dua parameter pembeda, yaitu ukuran *Cutting tool* yang dipakai, satu diantaranya memakai *Cutting tool* 0.2 mm *flat end mill*, dan yang satunya menggunakan *Cutting tool* 0.1 mm *ball-nose end mill*. Keduanya akan ditunjukkan dalam pembahasan ini. Pertama-tama akan dibahas operasi pemesinan semi-*finishing* yang menggunakan *Cutting tool* berdiameter 0.2 mm *flat end mill*, sampai kepada proses *finishing*, baru kemudian proses semi-*finishing* yang menggunakan *Cutting tool* berdiameter 0.1 mm *ball-nose end mill* akan didiskusikan.

Tabel 4.3 *Cutting parameter* pada operasi *Contour area Semi finishing*

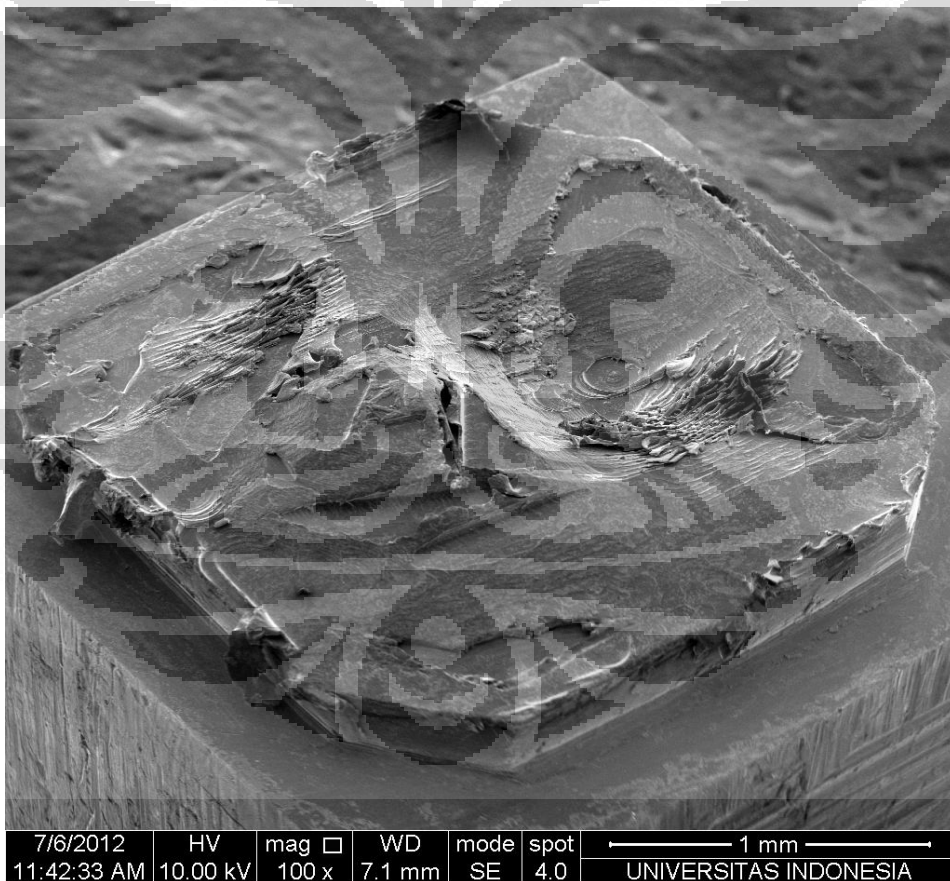
Semi-finishing operation			
<i>Contour area</i>			
<i>tool flat end mill 0.2 mm (230 passes)</i>			
<i>Surface area drive method</i>			
Cutting moves		Non-cutting moves	
Part final stock	0.02 mm	Engage open area	Plunge 100% tool
Depth per cut	0.01 mm	engage closed area	same as open area
Width of cut	0.01 mm	Retract	same as engage
intol	0.05 mm	Final retract	same as retract
outol	0.05 mm	Clearance	1mm



Gambar 4.15 *tool path contour area semi finishing* aktual



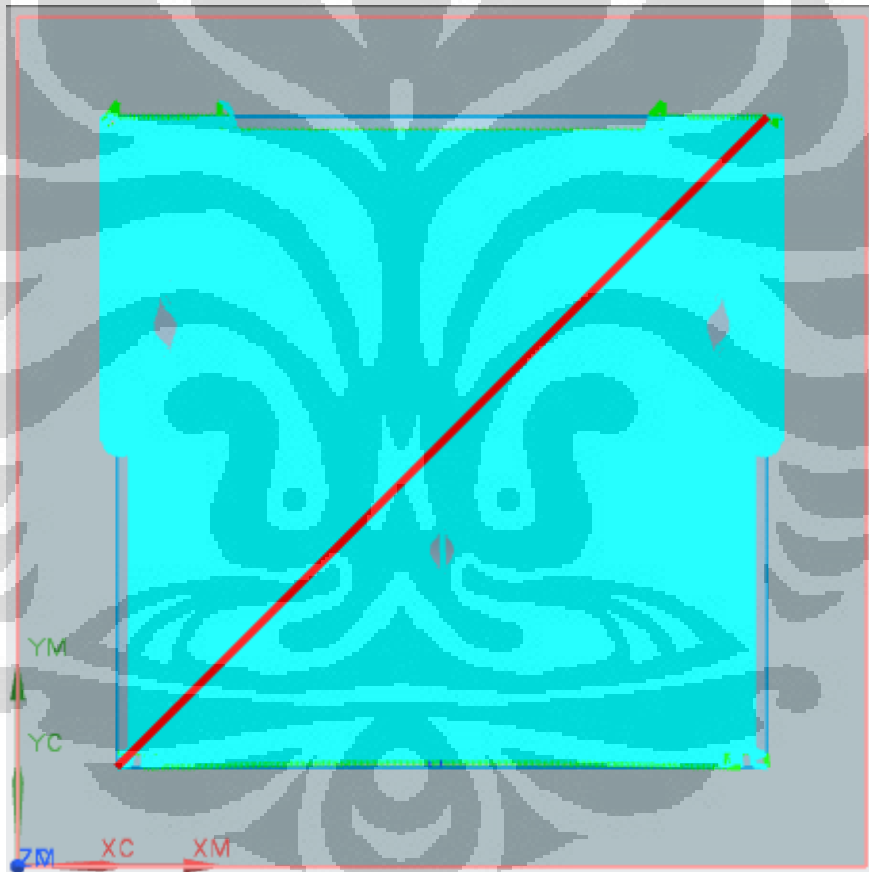
Gambar 4.16 Geometri hasil pemesinan *semi finishing* dengan pahat 0.2 mm *flat end mill* pada software

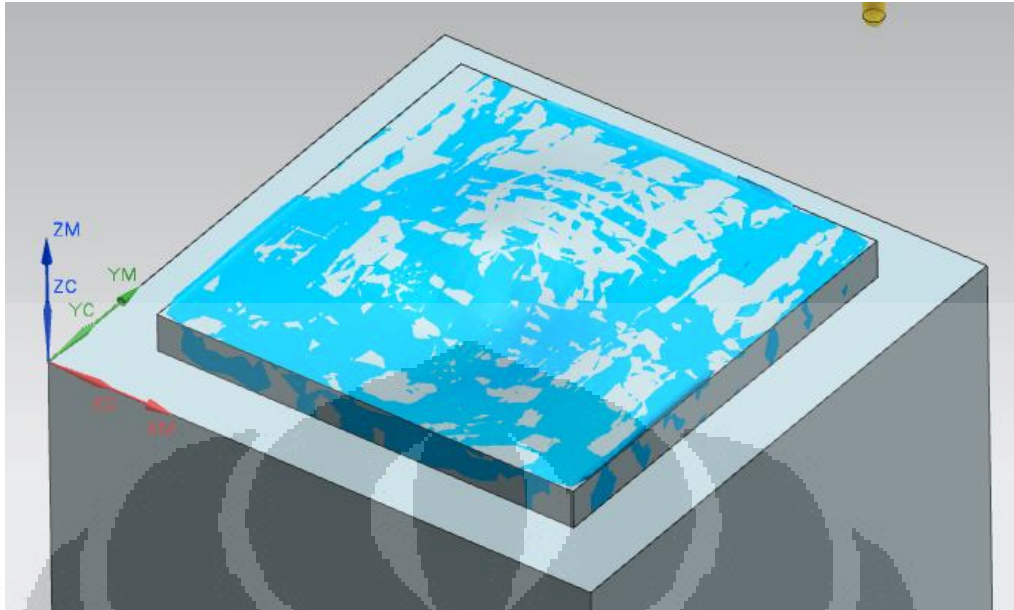


Gambar 4.17 Geometri hasil pemesinan *semi finishing* dengan pahat 0.2 mm *flat end mill* secara aktual

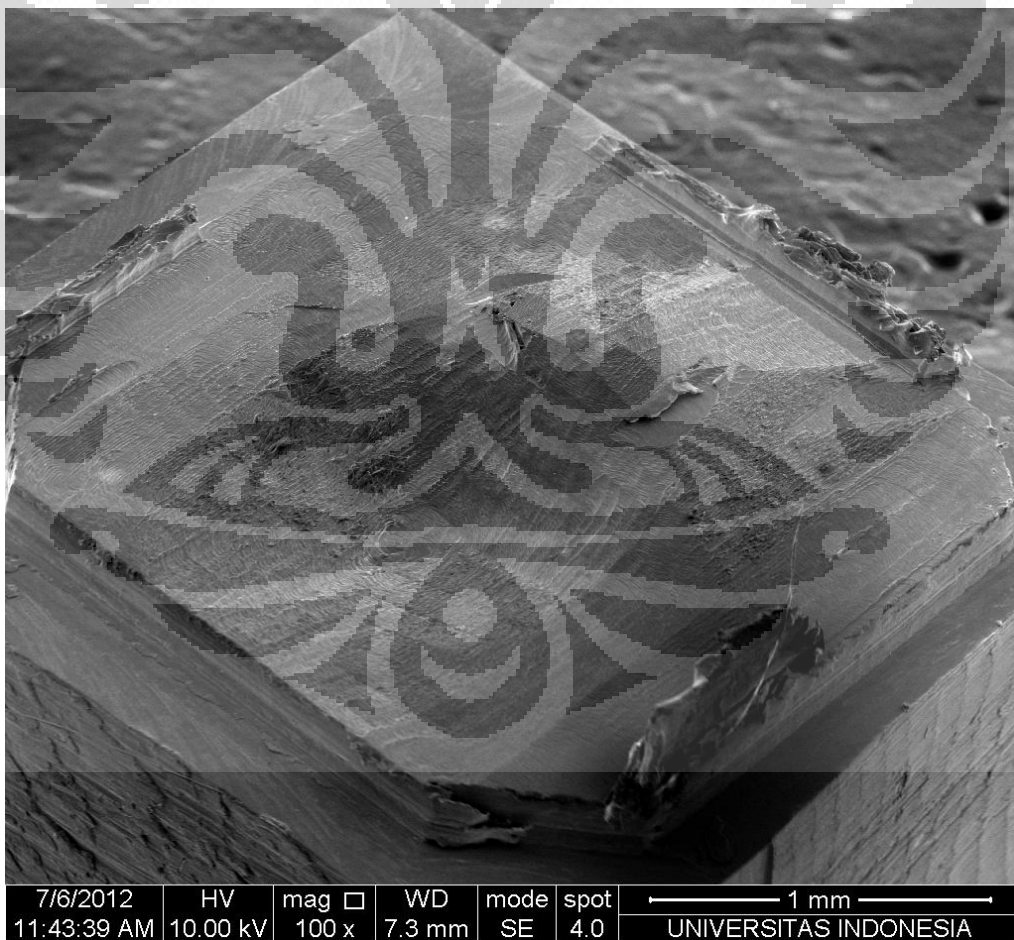
Tabel 4.4 *Cutting parameter pada operasi Contour area Semi finishing*

<i>Finishing operation</i>			
<i>Contour area</i>			
<i>tool ball-nose end mill 0.1 mm</i>			
<i>2 layer cutting (460 passes/layer)</i>			
<i>Surface area drive method</i>			
<i>Cutting moves</i>		<i>Non-cutting moves</i>	
<i>Part final stock</i>	0	<i>Engage open area</i>	<i>Plunge 200% tool</i>
<i>Depth per cut</i>	0.01 mm	<i>engage closed area</i>	same as open area
<i>Width of cut</i>	0.005 mm	<i>Retract</i>	same as engage
<i>intol</i>	0.005 mm	<i>Final retract</i>	same as retract
<i>outol</i>	0.005 mm	<i>Clearance</i>	1mm

Gambar 4.18 *tool path contour area finishing aktual*



Gambar 4.19 Geometri hasil pemesinan *finishing* pada *software*



Gambar 4.20 Geometri hasil pemesinan *finishing* secara aktual

Table 4.5 *Machining Time*

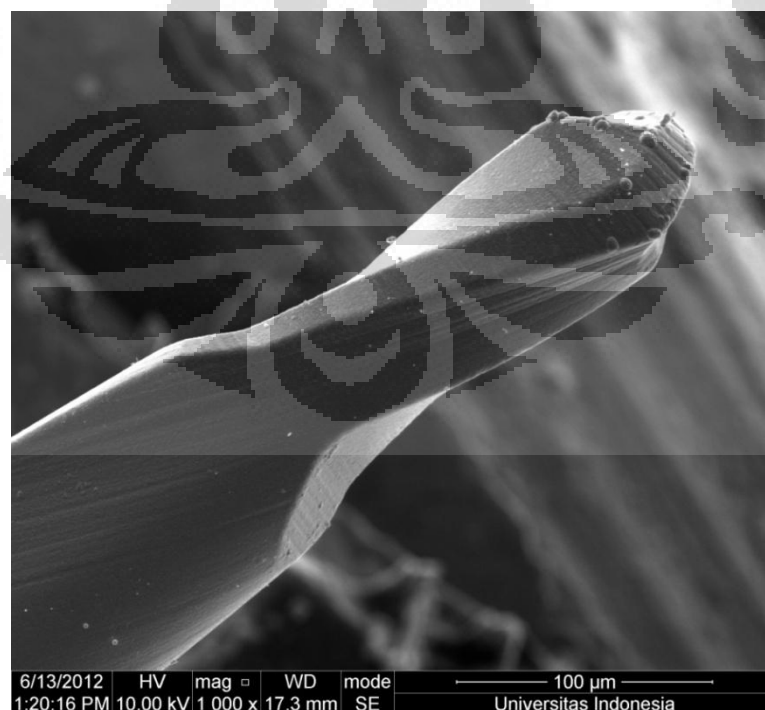
Proses	Sculptured surface male mold			
	Tipe Operasi	Cutting tool	Waktu pemesinan teoritis	Waktu pemesinan aktual
Facing	Manual	Flat end 2.0 mm	3 menit	
Roughing	Face Milling Area	Flat end 2.0 mm	5 menit 57 detik	7 menit 10 detik
	Rest Milling	Flat end 0.2 mm	53 menit 39 detik	2 jam 30 menit 34 detik
Semi-finishing	Contour Area	Ball nose 0.1 mm	18 menit 18 detik	1 jam 46 detik
Finishing	Contour Area	Ball nose 0.1 mm	35 menit 32 detik	3 jam 20 menit
Total			1 jam 56 menit 26 detik	7 jam 1 menit 30 detik

Tabel di atas menunjukkan perbandingan waktu pemesinan yang dikerjakan pada penelitian ini. Deviasi yang terjadi dari waktu pemesinan teoritis dengan waktu pemesinan aktual yang mencapai 5 jam ditenggarai terjadi karena adanya span waktu dari pergerakan motor yang mengikuti NC-File. Karena pergerakannya yang diskrit, setiap mengawali dan mengakhiri pergerakan terdapat sedikit waktu idle yang kemudian terakumulasi oleh banyaknya *CL Point* yang ditelusuri. Jumlah *CL Point* yang mencapai puluhan ribu membuat akumulasi dari eror atau deviasi waktu pemesinan aktual terhadap waktu pemesinan teoritis menjadi semakin besar.

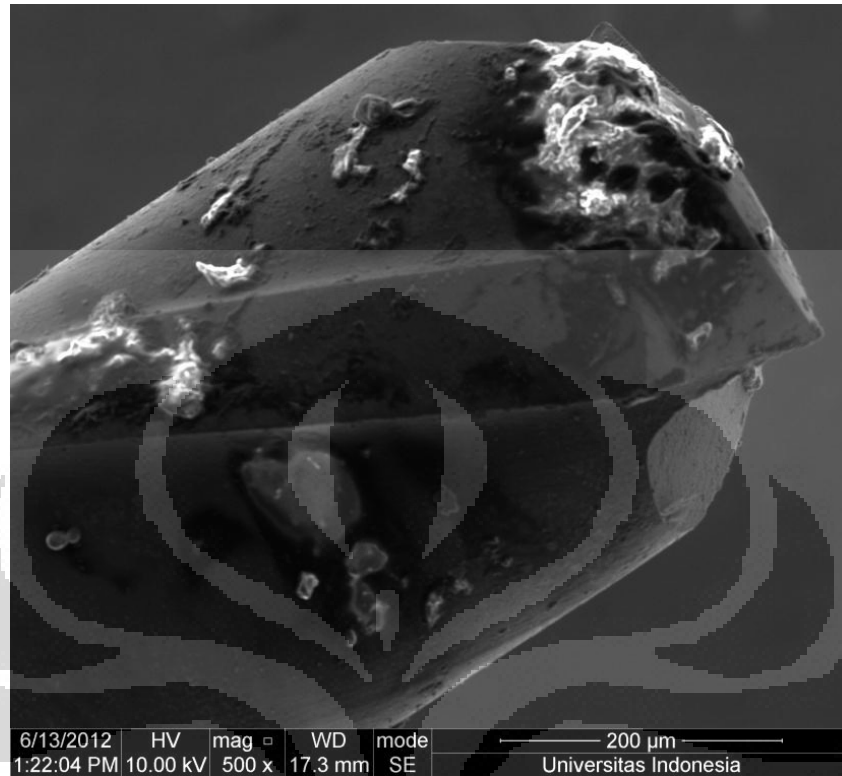
4.3 *Tool life*

Cutting tool sebagai alat pemotong yang bekerja aktif dalam proses pemesinan juga seringkali menjadi salah satu penyebab dari kegagalan pemesinan. *Cutting tool*, khususnya dengan ukuran yang kecil akan sangat mudah menjadi aus atau mengalami *wear*, apalagi jikalau dioperasikan dengan *cutting parameter* yang tidak sesuai. Pendeknya *tool life* seringkali merupakan kesalahan machinist berkaitan dengan penentuan *cutting parameter*, *cutting method*, *machining strategy*, ataupun *machining lubricant* dan *coolant*. Padahal biaya pengadaan *cutting tool* tidaklah sedikit karena cost produksi dari *cutting tool*, khususnya *cutting tool* yang berdiameter semakin kecil akan bernilai semakin mahal. Tidak heran biaya pembuatan *cutting tool* sangatlah tinggi karena diperlukannya proses manufaktur yang sangat presisi dan dengan geometri *cutting edge* yang tidak mudah menjadikannya semakin bernilai tinggi. Namun, semakin sulit proses manufaktur dan semakin kecil ukuran *cutting tool* belum dapat diiringi dengan ketahanan yang super dari *cutting tool* tersebut. *Cutting tool* yang digunakan untuk pemesinan skala mikro (diameter dibawah 0.5 mm) sangatlah rawan

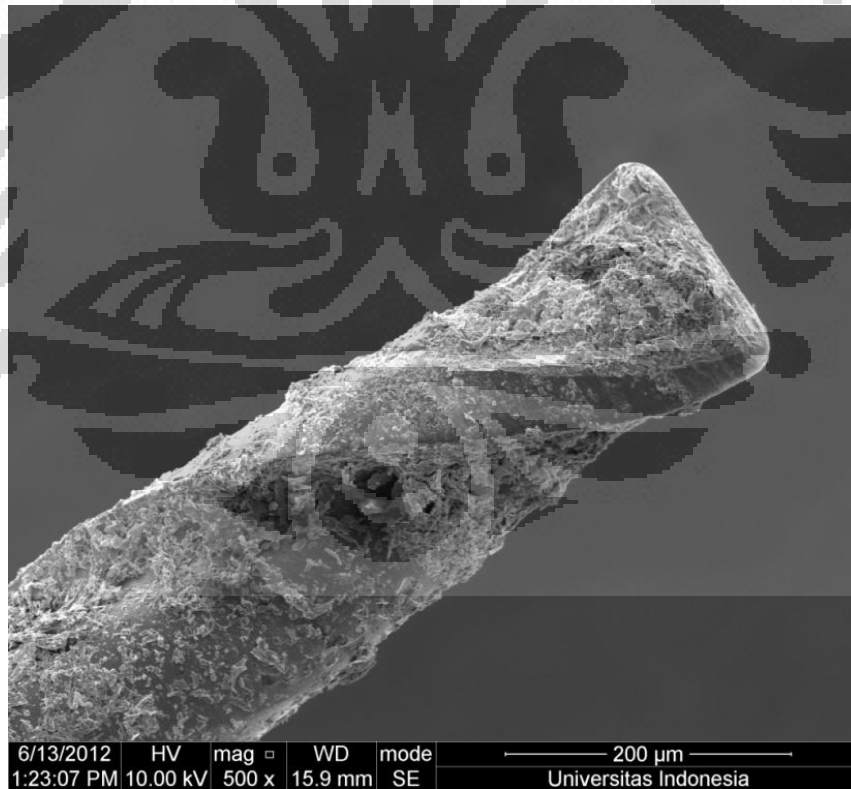
terhadap patah (*breakage*) ataupun kondisi cepat aus (*rapid wearing*). Tanpa pengetahuan yang komprehensif yang masih sedang dikembangkan tentang pemesinan mikro, (mencakup *cutting parameter* yang direkomendasikan) sulit untuk mendapatkan kondisi ideal untuk lingkungan kerja *cutting tool* dalam pemesinan mikro ini. Namun, sudah banyak percobaan yang dilakukan sejauh ini dan walaupun masih bersifat eksperimental, nilai-nilai *cutting parameter* yang pernah dipakai dalam percobaan-percobaan sebelumnya menjadi sangat berharga demi kepentingan penelitian pemesinan mikro, salah satunya dalam penelitian ini. Sehingga data-data *cutting parameter* yang diadaptasi dari percobaan-percobaan sebelumnya yang menjadi salah satu titik tolak utama atau acuan penentuan *cutting parameter* yang diterapkan dalam penelitian ini. Selain dari pada percobaan-percobaan yang sudah dikerjakan, rekomendasi dari *manufacturer* atau perusahaan pembuat *cutting tool* adalah sumber referensi yang amat penting dan paling valid mengenai kondisi kerja maksimal yang mampu dikenakan kepada *cutting tool*. Sudah menjadi hal umum bahwa *manufacturer* harus mengeluarkan data-data *cutting parameter* yang direkomendasikan sehingga *end-user* yang belum terlalu berpengalamanpun sekalipun dapat dengan nyaman melakukan pemesinan.



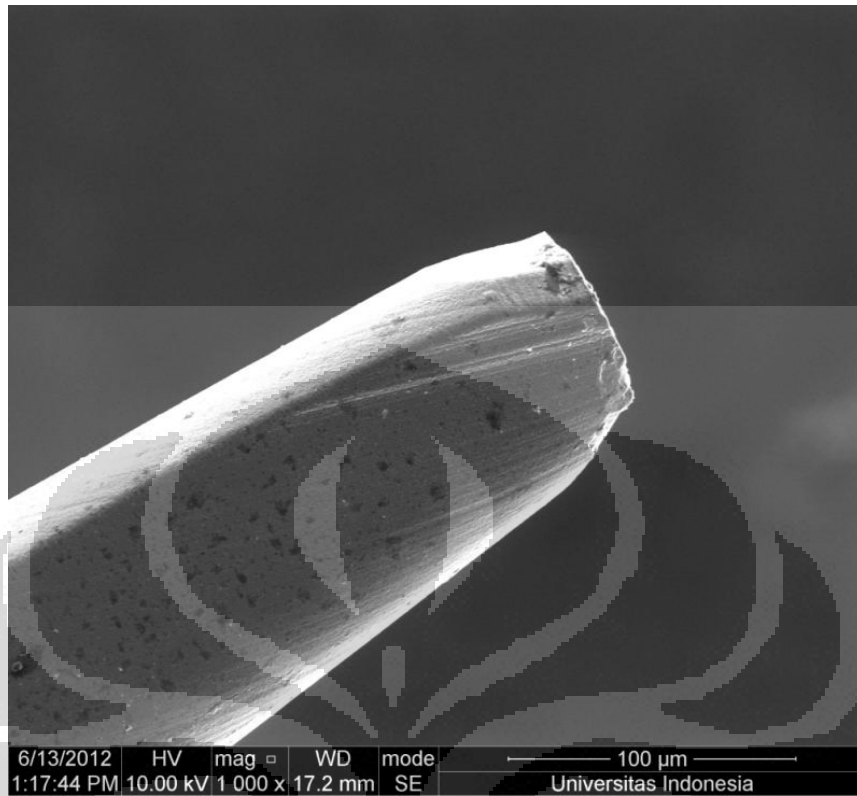
Gambar 4.21 *Cutting tool* 0.1 mm kondisi baru



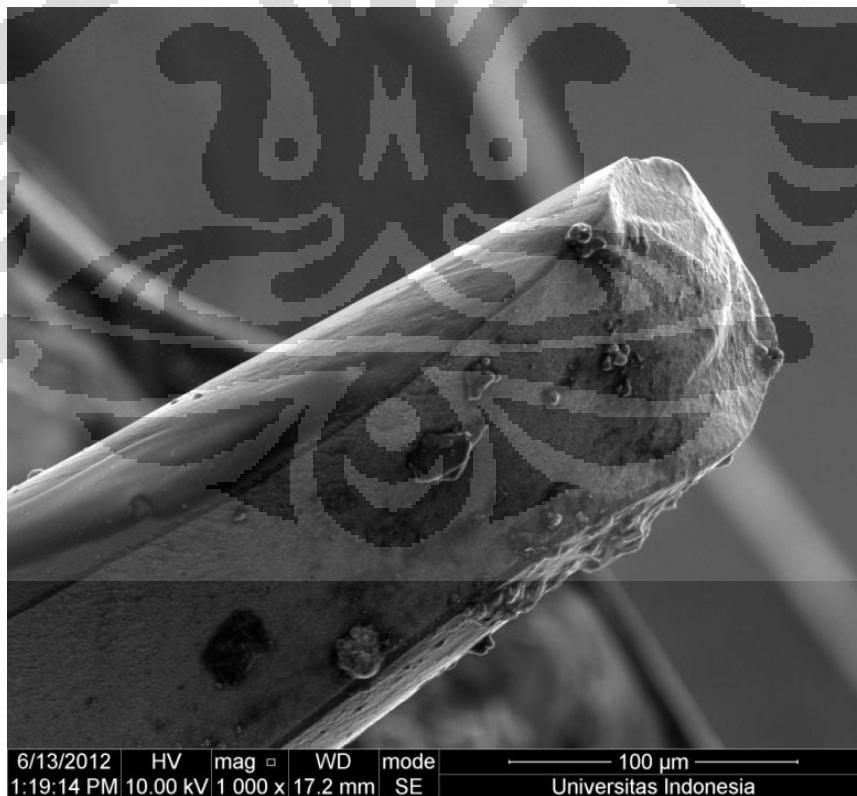
Gambar 4.22 *Cutting tool* 0.5 mm setelah pemakaian



Gambar 4.23 *Cutting tool* 0.2 mm setelah pemakaian



Gambar 4.24 *Cutting tool* 0.1 mm setelah 16 jam pemakaian



Gambar 4.25 *Cutting tool* 0.1 mm setelah 32 jam pemakaian

Gambar-gambar di atas adalah hasil gambar SEM dari *Cutting tool* yang baru sampai yang sudah aus pada waktu pemakaian tertentu. Terlihat jelas bahwa flute dari *cutting tool* yang baru masih ada dan bentuk atau geometrinya masih baik. Sedangkan, di lain sisi, *cutting tool* setelah pemakaian terlihat sudah sangat “gundul” bahkan terlihat seperti sudah patah. Oleh karena itu, sangat penting memiliki instrument yang dapat mendeteksi tingkat keausan dari *cutting tool*, agar hasil pemesinan dapat terhindar dari eror yang disebabkan oleh *tool wear* ini.



BAB 5

ANALISIS LINTASAN PAHAT OPERASI *ROUGHING*

Roughing merupakan proses pemesinan yang biasa dilakukan di tahap-tahap awal setelah proses facing. Tujuan utama dari proses *roughing* adalah pemakanan atau pelepasan *material* sebanyak-banyaknya agar meninggalkan sejumlah kecil *uncut allowance/part stock* tertentu untuk proses *semi-finishing* atau *finishing* [SSM]. Proses ini pada operasi makro menjadi proses pemesinan yang memerlukan paling banyak waktu, dan berbicara waktu dalam produksi, itu berarti uang. Makin banyak waktu dipakai, makin banyak biaya produksi yang diperlukan atau makin banyak keuntungan atau pendapatan yang seharusnya dapat diperoleh namun urung dihasilkan. Oleh karena itu, walaupun tidak menentukan hasil kualitas permukaan secara langsung seperti yang dilakukan oleh proses *finishing*, proses *roughing* memegang peranan penting dalam proses pemesinan, khususnya dalam menekan biaya produksi dengan cara menyajikan proses *roughing* yang efektif dan efisien. Dalam penelitian ini, proses *roughing* yang dipelajari lebih lanjut yaitu proses *roughing* yang dilakukan pada model *sculptured surface male mold*. Pembahasan yang dilakukan terhadap dua metode operasi *roughing* yang berbeda adalah tentang perbandingan *machining* time teoritis dan aktual, jumlah *CL Point* yang dihasilkan, besar *tolerance band* yang ditentukan, kemudian mengevaluasi hasil pemesinan. Setelah itu, pada perbandingan antara *micro-mold* dan *macro-mold* pembahasan yang dilakukan adalah perbandingan *cutting* parameter yang digunakan seperti *cutting tool*, *depth of cut*, *width of cut*, *cutting pattern*, serta mengkalkulasi densitas *cutter location point*.

Pengamatan pada lintasan pahat *roughing* di penelitian ini menekankan kepada dua hal, yaitu:

1. Perbandingan antara dua metode (jenis) pemesinan *milling roughing* yang berbeda terhadap efektifitas lintasan pahat yang dihasilkan.
2. Perbandingan antara benda kerja ukuran mikro dengan benda kerja serupa dalam skala makro terhadap densitas dan penskalaan ukuran toleransi pemesinan yang dipakai.

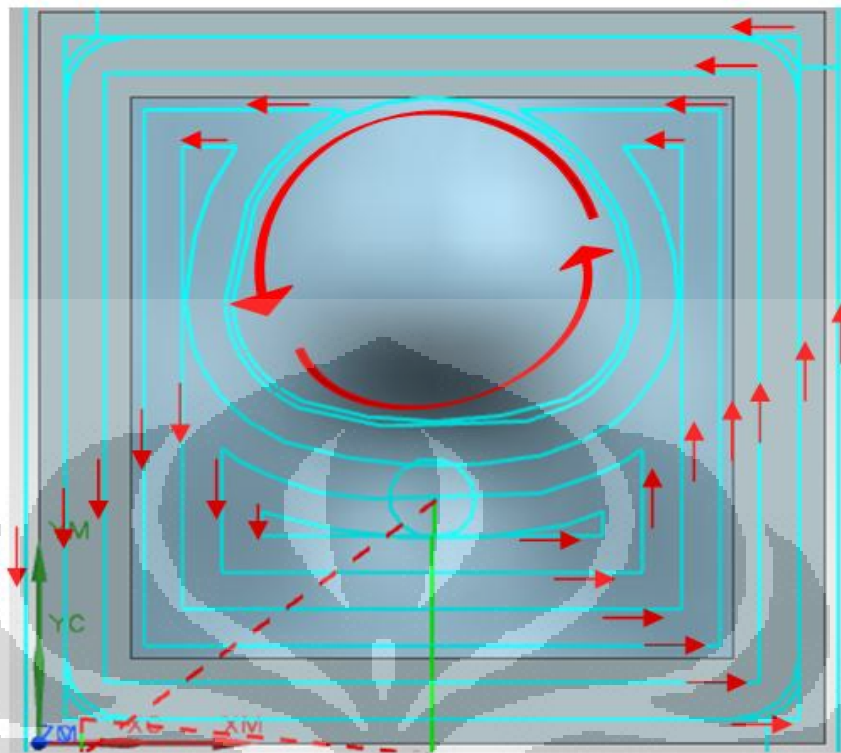
5.1 Perbandingan operasi *roughing* metode *face milling area* dengan *cavity mill*.

Pada penelitian proses *roughing* dilakukan percobaan dengan menggunakan dua metode *roughing* yang berbeda. Seperti dijelaskan sebelumnya, proses *roughing* yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari dua operasi. Dua metode yang menjadi bahan perbandingan adalah operasi *face milling area* dengan operasi *cavity milling*. Penggunaan dua operasi dilakukan untuk membandingkan efektifitas dari metode pemesinan yang dilihat dari besarnya *machining time* yang dilakukan. Dua operasi ini tentunya memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lain, perbedaan mendasar dari keduanya adalah kategori sub-operasinya. *Face milling area* termasuk *planar mill*, dimana proses pemesinan hanya berlaku atau mengenali geometri-geometri yang berbentuk *planar* atau datar saja. Hal tersebutlah yang menyebabkan penetapan *part stock* pada proses ini menjadi 0 untuk mencapai permukaan datar dari *floor* atau permukaan dasar. Di lain sisi, *cavity mill* termasuk sub-operasi *mill contour*, dimana operasi ini mengenali geometri-geometri berkontur yang *notabene* lebih kompleks dibandingkan geometri datar. Operasi *cavity mill* umum dipakai untuk membuang atau melepaskan metrial dalam jumlah yang besar sehingga sering ditemukan sebagai aplikasi dalam proses *roughing*.

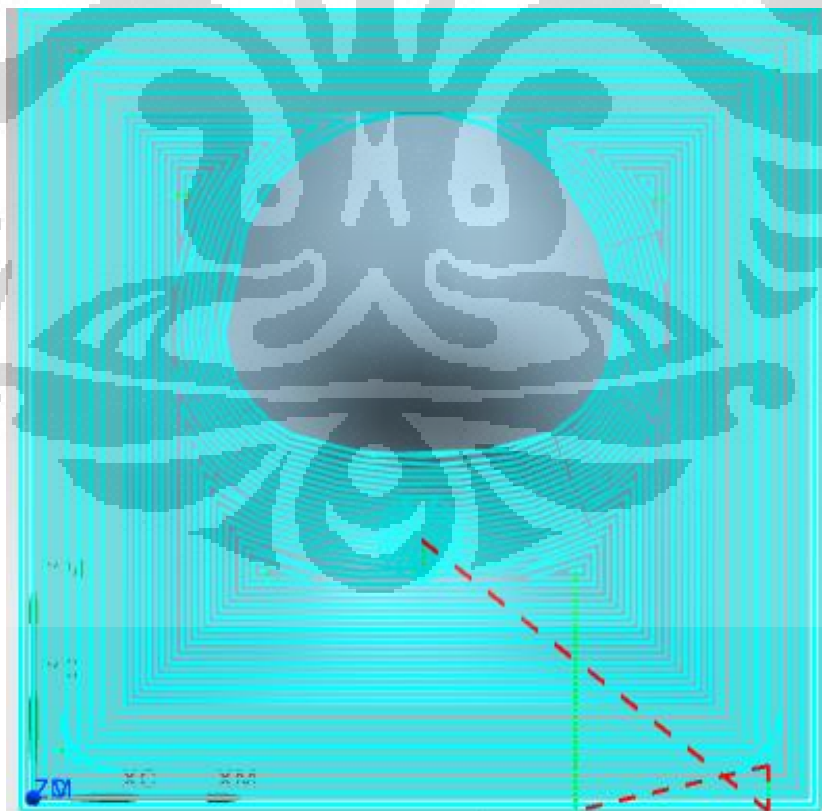
Perbandingan antara kedua operasi ini pada akhirnya akan menunjukkan operasi mana yang mampu menghasilkan *tool path* yang paling efektif diantara keduanya. Lamanya waktu pemesinan praktis menjadi parameter pertama yang menunjukkan efektifitas dari *tool path* yang dihasilkan. Maka dari itu dilakukan perbandingan waktu pemesinan baik waktu pemesinan teoritis maupun waktu pemesinan aktual diantara kedua operasi ini. Kemudian dilakukan juga perbandingan jumlah *CL Point* diantara kedua operasi ini, tentunya makin banyak *CL Point* akan membuat *spare time* dari pergerakan *tool* semakin besar dan terakumulasi dan membuat *machining time* menjadi semakin besar. Jumlah *CL Point* yang dihasilkan tentunya sangat bergantung kepada besarnya *tolerance*

band yang ditetapkan dalam proses pemesinan, oleh karena itu, besar *tolerance band* juga diangkat sebagai parameter perbandingan.

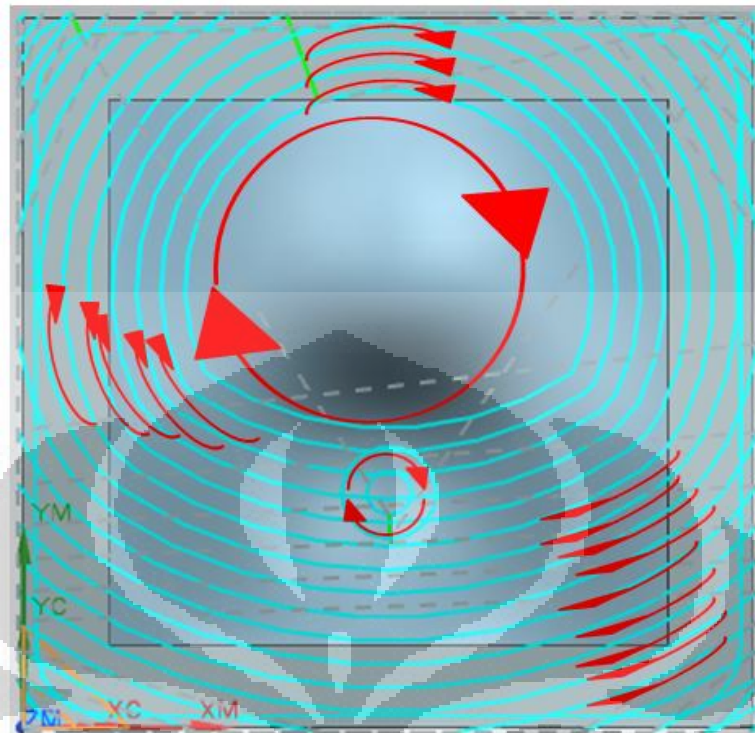
Operasi *face milling* dan *cavity mill* yang dilakukan dengan menggunakan ukuran diameter yang sama (0.5 mm flat end mill) diberikan nilai *tolerance band* yang sama yaitu 0.01 mm agar perbandingan yang dilakukan menjadi *valid* dan *comparable*. Hasilnya, operasi *face milling area* yang dikerjakan memerlukan waktu pemesinan aktual sebesar 28:12 menit, lebih lama dari pada operasi *cavity mill* yang memerlukan waktu pemesinan aktual sebesar 25:43 menit. Hal ini melenceng dari hipotesis awal dimana perkiraan *tool path* dengan jumlah *CL Point* yang lebih banyak akan memerlukan atau memakan waktu yang lebih banyak dibandingkan dengan *tool path* yang memiliki jumlah *CL Point* yang lebih sedikit. Operasi *face milling area* menghasilkan sejumlah 1299 *CL-Point*, jauh lebih sedikit dari jumlah *CL Point* yang dihasilkan oleh operasi *cavity mill* yaitu sejumlah 1876 *CL-Point*. Hal ini menjadi sebuah fenomena yang menarik untuk dianalisis penyebabnya. Analisis yang diambil dari fenomena ini adalah arah atau *cutting pattern* yang terdapat pada masing-masing operasi. Pada operasi *face milling area*, pola *tool path*nya menggunakan metode *follow periphery*, dimana bagian *tool path* luar mengikuti bentuk persegi geometri benda kerja, dan bagian dalam bentuknya mengikuti pola dari geometri *concave-convex region* dan berbentuk lingkaran (gerakan melingkar). Sedangkan operasi *cavity mill* mempunyai pola melingkar dari bagian terluar sampai bagian terdalam. Terlihat dari kedua pola *tool path* tersebut, diambil kesimpulan bahwa gerakan melingkar sepanjang *tool path* membuat pergerakan *tool* menjadi lebih *smooth* sehingga menjadikan waktu pemesinan menjadi lebih singkat dibandingkan pola *tool path face milling area* walaupun dengan jumlah *CL Point* yang lebih banyak.



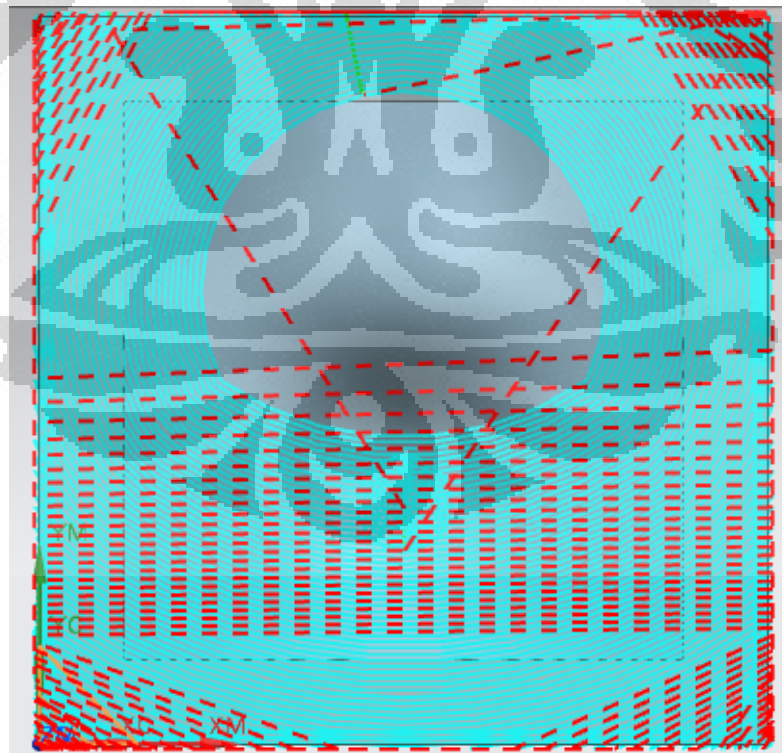
Gambar 5.1 Arah lintasan pahat proses *roughing face milling area* (simplifikasi)



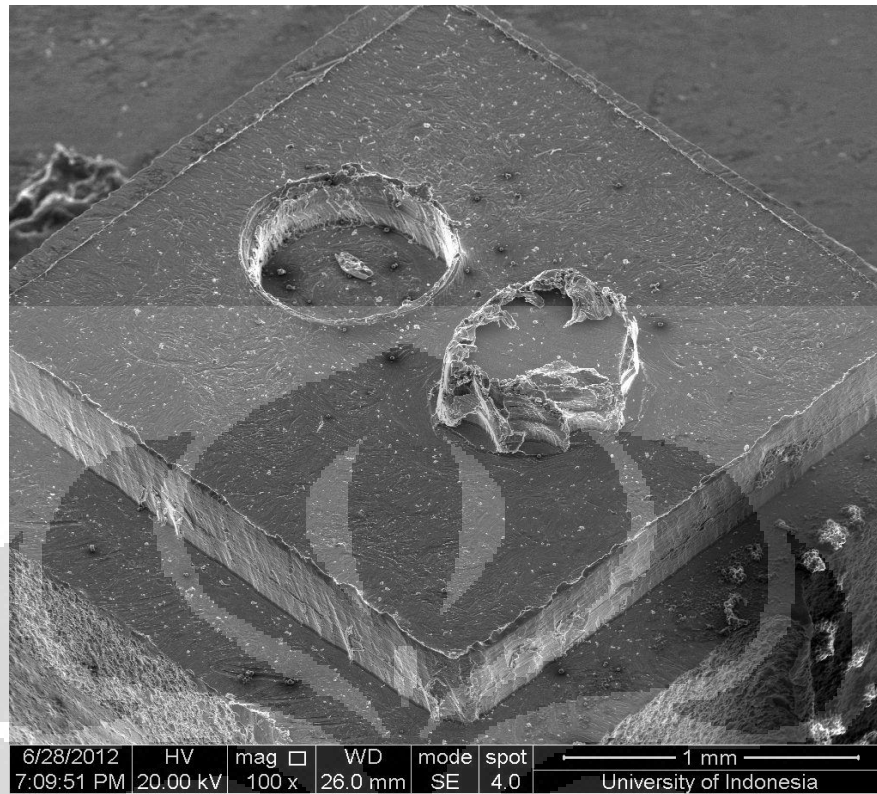
Gambar 5.2 Lintasan pahat proses *roughing face milling area* (aktual)



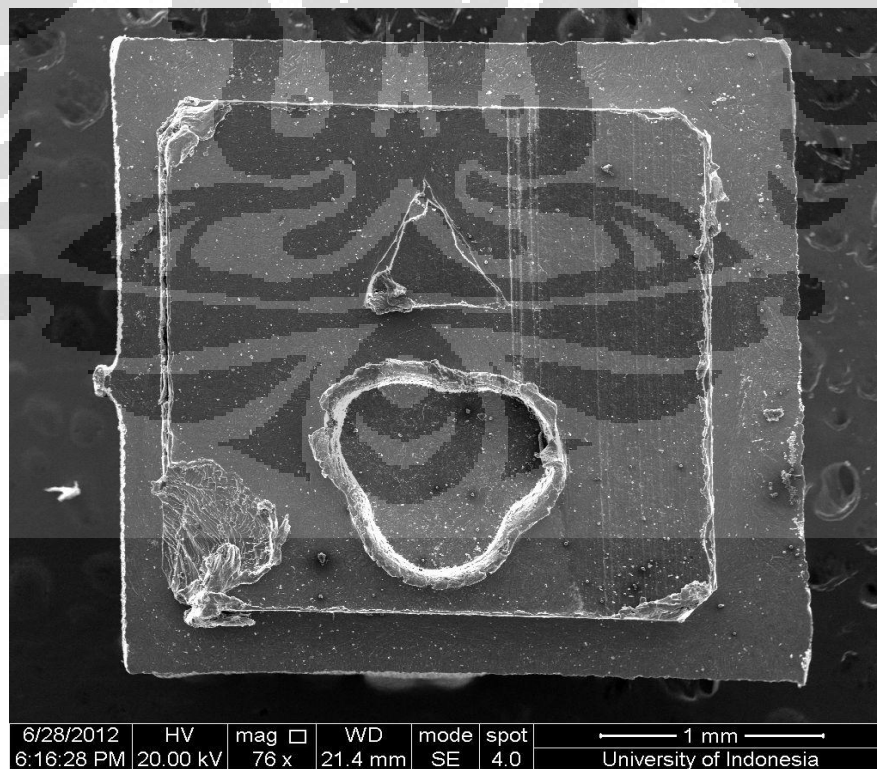
Gambar 5.3 Arah lintasan pahat proses *roughing cavity mill* (simplifikasi)



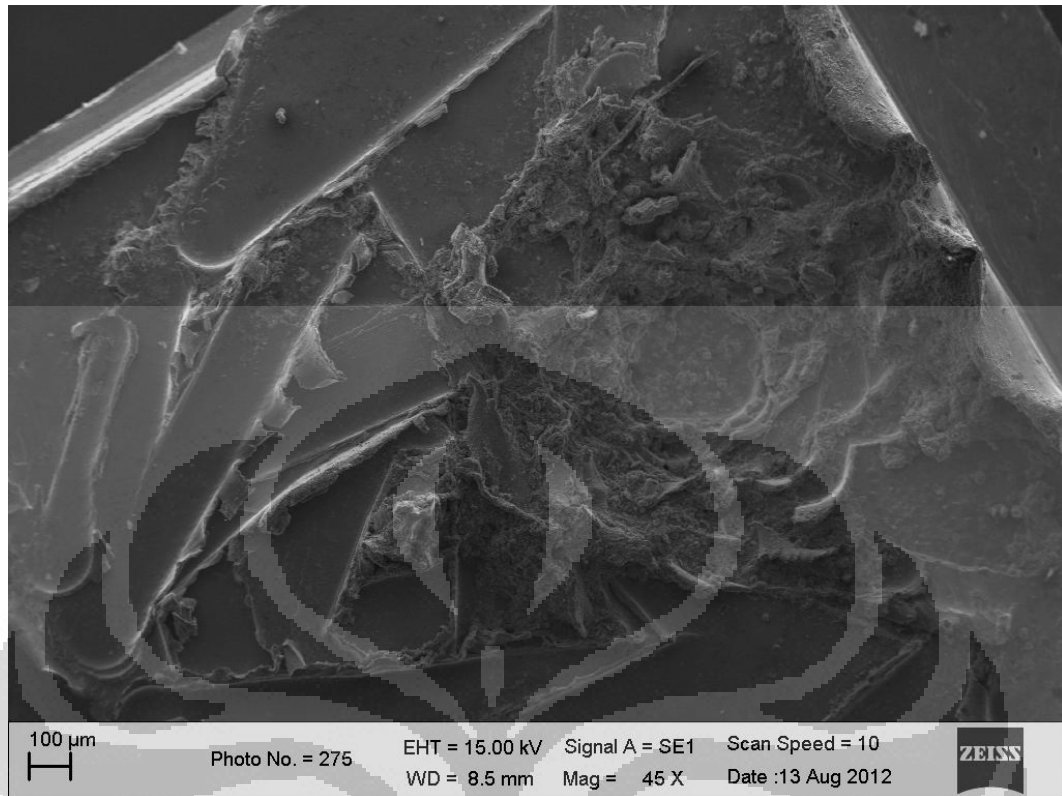
Gambar 5.4 Lintasan pahat proses *roughing cavity mill* (aktual)



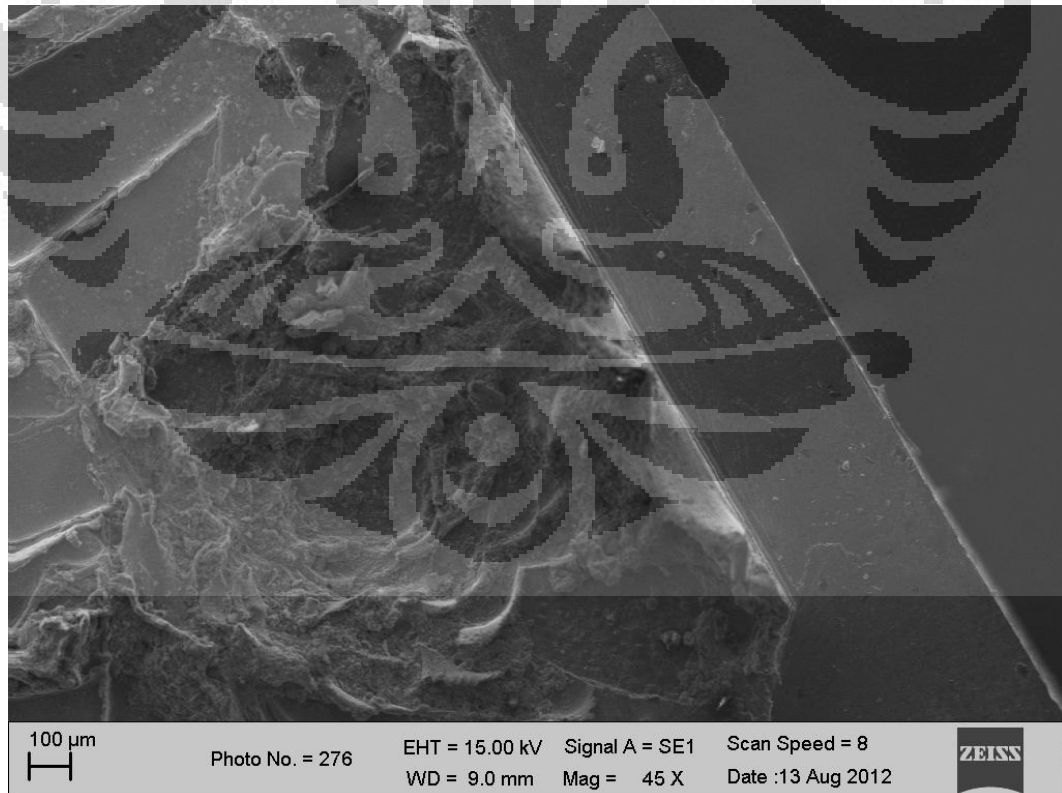
Gambar 5.5 Geometri hasil pemesinan *roughing face milling area*



Gambar 5.6 Geometri hasil pemesinan *cavity mill*



Gambar 5.7 Geometri hasil pemesinan *proses roughing z-milling area*



Gambar 5.8 Geometri hasil pemesinan *proses roughing z-milling area*

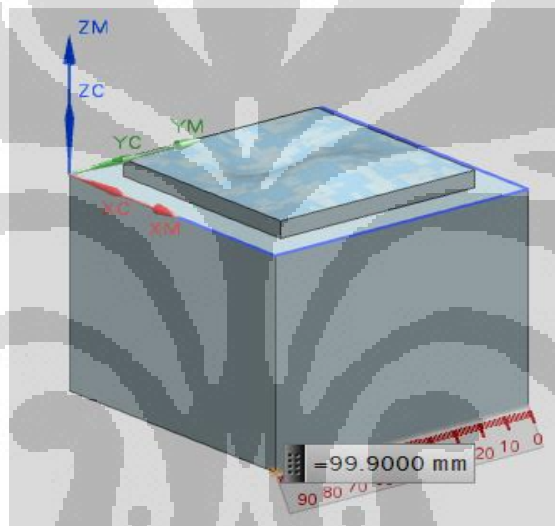
Tabel 5.1 Parameter Perbandingan dua metode proses *Roughing*

PARAMETER	FACE MILLING	CAVITY MILLING
THEORITICAL MACHINING TIME	11.45 Menit	19:04 Menit
ACTUAL MACHINING TIME	28:12 Menit	25:43 Menit
NUMBERS OF CL-POINT	1299	1876
INTOL-OUTOL	0.01 mm	0.01 mm

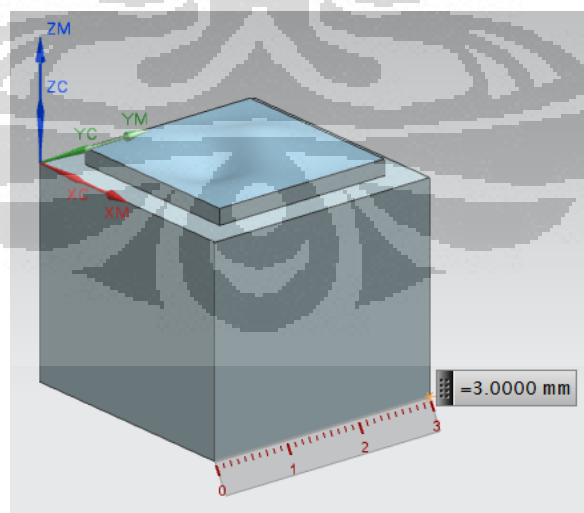
5.2 Perbandingan operasi *roughing face milling area* terhadap *micro-mold* dan *macro-mold*.

Perbandingan kedua yang dikerjakan adalah operasi *roughing* yang dikerjakan pada *micro-mold* dengan operasi *roughing* yang dikerjakan pada *macro-mold*. Hal ini dilakukan untuk mencari tahu seberapa besar perbedaan nilai *cutting parameter* yang diterapkan dalam skala mikro dengan *cutting parameter* pada skala makro. Kemudian waktu pemesinan teoritis juga menjadi parameter pembanding diantara skala pekerjaan yang berbeda ini. Perbedaan dimensi antara kedua benda kerja sangat signifikan, benda kerja mikro berukuran 3 x 3 x 3 mm, sedangkan benda kerja makro berukuran 33 kali lebih besar, atau sekitar 10 x 10 x 10 cm. Tentunya *cutting parameter* yang dikerjakan pada benda mikro tidak dapat diaplikasikan kepada benda kerja makro, dan penentuan *cutting parameter* benda kerja makro kembali menggunakan referensi dari perusahaan pembuat *Cutting tool* dan penskalaan dari ukuran mikro sehingga dapat dianggap *comparable*. Metode yang dilakukan dalam perbandingan yang dikerjakan adalah dengan mengamati bagian *tool path* dari satu *area* tertentu dalam posisi yang sama baik di benda kerja mikro dan benda kerja makro. Kemudian satu bagian *tool path*

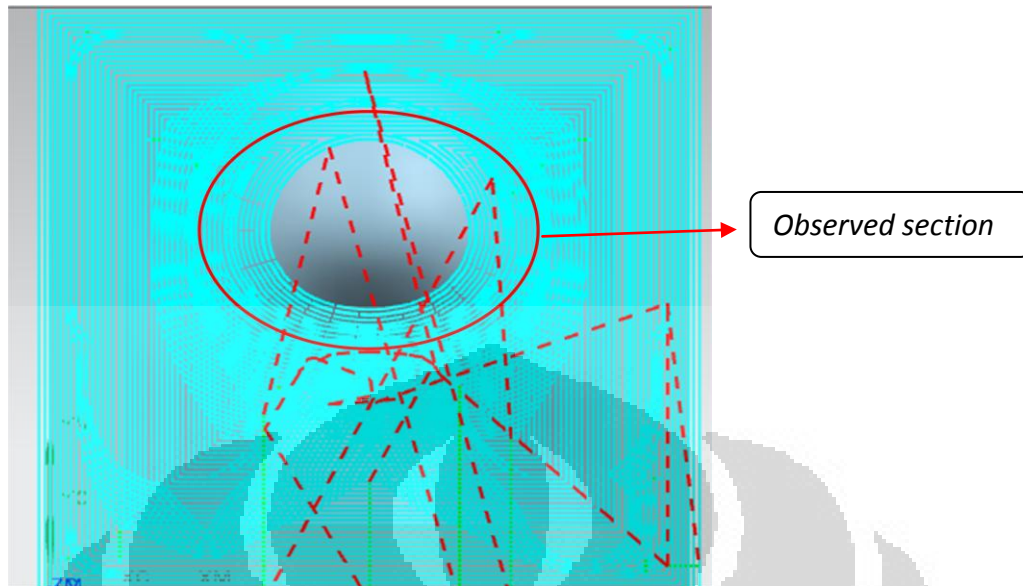
tersebut yang berbentuk lingkaran dihitung panjang lintasannya, dan juga banyaknya *cutter location point* yang terdapat sepanjang lintasan tersebut untuk kemudian didapatkan densitas atau kerapatan dari *CL-Point*. Densitas *CL Point* menjadi hal yang penting mengingat bahwa jumlah *CL Point* dalam satu lintasan akan mempengaruhi waktu pelepasan *material* karena terdapat span waktu pergerakan mesin dari titik *cutter location* ke titik *cutter location* yang lain. Oleh karena itu, perbandingan densitas *CL Point* di *part* mikro terhadap *part* makro kemudian dilanjutkan dengan membandingkan waktu pemesinan keduanya sehingga didapatkan suatu nilai yang relevan dan mendukung hipotesis tersebut.



Gambar 5.9 Dimensi sampel skala makro



Gambar 5.10 Dimensi sampel skala mikro



Gambar 5.11 Bagian lintasan pahat yang diamati

Tabel 5.2 Perbandingan parameter part makro dengan part mikro

PARAMETER	MICRO	MACRO
WORKPIECE DIMENSION	(3 x 3 x 3) mm	(99.9 x 99.9 x 99.9) mm
CUTTING TOOL	0.5 mm	16 mm
DEPTH OF CUT	0.15 mm	2.4 mm
WIDTH OF CUT	0.025 mm	1.6 mm
TOLERANCE BAND	0.002 mm	0.06 mm
CL-POINT DENSITY	3.95 (CL-Point/mm)	14.86 (CL-Point/mm)
THEORITICAL MACHINING TIME	11.45 MENIT	62 MENIT

Lintasan yang diamati hanyalah satu *pass* / bagian, yaitu lintasan melingkar teratas yang mengelilingi bukit atau puncak dari geometri *sculptured surface*. Karena proses yang digunakan sama, maka terbentuknya lintasan melingkar tersebut dapat dianggap serupa dan layak untuk diperbandingkan. Dari hasil-hasil perbandingan di atas, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan di semua parameter yang diperbandingkan antara *part* mikro dengan

part makro. Hal tersebut jelas dan sudah dapat diperkirakan sebelumnya mengingat perbedaan dimensi banda kerja yang sangat besar yang sudah pasti akan berdampak kepada setiap *cutting parameter* dan hasil pemesinan. *Cutting tool* yang dipakai sudah berbeda jauh ukurannya, selain itu fenomena-fenomena yang terjadi pada *cutting tool* dalam skala mikro sudah berbeda dengan skala makro. Contohnya adalah batas pemakaian *tool* sampai terjadi *tool wear*, yang jelas akan sangat berbeda nilainya. Selain itu, nilai *depth of cut* dan *width of cut* juga menjadi sangat berbeda karena ketergantungannya terhadap ukuran diameter *cutting tool*. Namun, parameter yang menjadi nilai yang menjadi patokan perbandingan adalah nilai kerapatan *cutter location point* dan *tolerance band* yang dipakai. Pada *part* mikro dipakai *tolerance band* sebesar 0.002 mm atau 2 μm , sedangkan pada *part* makro dipakai nilai 0.06 mm sebagai *tolerance band*. Perbedaan nilai tersebut tentunya merupakan perbedaan yang sangat mencolok, dan yang pasti akan mempengaruhi kerapatan *cutter location point* sepanjang lintasan pahat. Hasilnya, dalam setiap *millimeter* lintasan pahat *part* mikro, terdapat kurang lebih 3.59 *CL-Point*, lebih sedikit dibandingkan 14.86 *CL Point* pada setiap *millimeter* lintasannya pada *part* makro.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

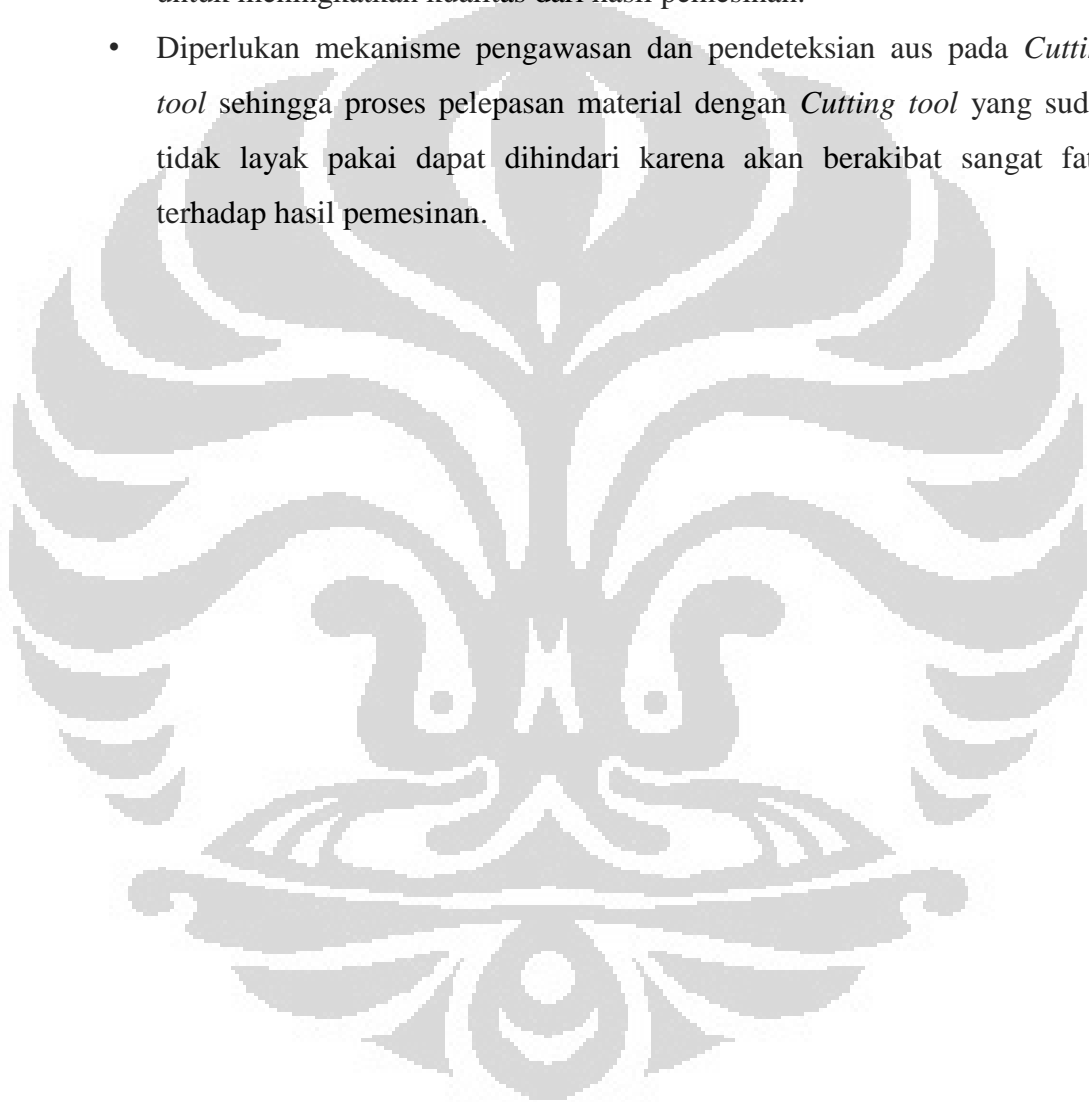
6.1 Kesimpulan

- Sistem CAM yang digunakan dalam penelitian ini mampu digunakan untuk proses manufaktur skala mikro.
- Operasi pemesinan mikro *milling* memerlukan lingkungan kerja dengan tingkat kepresisian yang sangat tinggi karena kesalahan/*error* sedikit saja dapat berakibat fatal kepada hasil pemesinan.
- Terciptanya atau terbentuknya *burr* atau *uncut chip* lebih rawan terjadi dan lebih terlihat merusak geometri hasil pada pemesinan skala mikro, karena ukuran *burr* tersebut kurang lebih sebanding dengan ukuran geometri produknya
- Operasi-operasi manufaktur skala mikro sudah tidak dapat lagi mengandalkan indera manusia seperti mata.
- Operasi *roughing* dengan menggunakan metode *mill contour* memiliki waktu pemesinan yang lebih cepat dibandingkan *planar mill* walaupun memiliki jumlah *CL Point* yang lebih banyak karena gerakan yang lebih fleksibel (pola spiral dan menyesuaikan geometri benda kerja).
- Operasi *roughing* yang biasanya memakan waktu lebih banyak pada operasi skala makro, ternyata memiliki waktu pemesinan tersingkat pada operasi skala mikro karena densitas *CL Point* yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan proses *semi finishing* maupun proses *finishing*.
- Densitas *CL Point* proses *roughing* pada skala makro lebih besar dibandingkan dengan skala mikro dengan *cutting parameter* yang *comparable*.

6.2 Saran Penelitian lebih lanjut

- Diperlukan adanya suatu mekanisme yang dapat mendeteksi posisi dan waktu saat *Cutting tool* atau pahat menyentuh benda kerja pertama kalinya. (untuk keperluan penentuan titik *origin*).

- Mekanisme *tool* setter juga merupakan hal tambahan yang sangat mendukung dan menyokong pengoperasian mesin *micro-milling* ini. Diperlukan untuk menetapkan suatu nilai *z-level* dari *cutting tool*, sehingga ketika diperlukan pergantian *cutting tool*, ketinggian atau *z-level*nya sama.
- Dibutuhkannya mekanisme pendinginan dan *cutting* fluid yang lebih baik untuk meningkatkan kualitas dari hasil pemesinan.
- Diperlukan mekanisme pengawasan dan pendeteksian aus pada *Cutting tool* sehingga proses pelepasan material dengan *Cutting tool* yang sudah tidak layak pakai dapat dihindari karena akan berakibat sangat fatal terhadap hasil pemesinan.



REFERENSI

- [1] Weinert K., Kahnis P., Koehler W. (2003) "Investigation of Scalling Effects on Modelling and Simulation of Scaled Milling Processes." 1st Colloquium Processscaling, Bremen
- [2] Takács M., Verö B., Mészáros I. (2003) "Micromilling of Metallic Materials." Elsevier Journal of Materials Processing Technology
- [3] Bang Young-bong, Lee Kyung-min, Oh Seungryul (2003) "5-Axis Micro Milling Machine for Machining Micro Parts." Springer-Verlag London Limited 2004
- [4] Litwinski Kai M., Min Sankee, Lee Dae-Eun, Dornfeld David A., Lee Nakkyu (2006) "Scalability of Tool Path Planning to Micro Machining." Precision Manufacturing Group, UC Berkeley
- [5] Li P., Zdebski D., Langen H. H., Hoogstrate A. M., Oosterling J. A. J., Schimdt R. H. M., and Allen D. M. (2010) "Micromilling of Thin Ribs with Ratios. IOP Publishing."
- [6] Rahman M., Kumar A. S., Prakash J. R. S. (2001) "Micro Milling of Pure Copper." Elsevier Journal of Materials Processing Technology
- [7] john a. schey introduction to manufacturing processes
- [8] Cimatron Group, Capitalizing on the Growing Demand for Micro-Milling: A Mold Maker's Guide
- [9] Dimov S., Pham D. T., Ivanov A., Popov K. "Micro Milling of Thin Features." Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff, UK
- [10] Biermann D., Kahnis P.
(2009) Analysis and Simulation of Size Effects in Micromilling. German Academic Society for Production Engineering
- [11] Byoung K. Choi., Jerard, R. B.,
"Sculptured Surface Machining, Theory and Applications" Kluwer Academic Publisher, London 1998.
- [12] Kiswanto,G., "CAD/CAM", Laboratorium Teknologi Manufaktur, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

- [13] Kiswanto, G., “Dasar Proses Manufaktur (Fundamentals of Manufacturing Processes)”, Laboratorium Teknologi Manufaktur, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [14] www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding , diakses tanggal 23 juni 2012 pukul 17.45 WIB
- [15] Boothroyd, G., Dewhurst, P., and Knight, W.,
“Product Design for Manufacture and Assembly.” Marcel Dekker, Inc., New York 10016.
- [15] <http://its.foxvalleytech.com/machshop3/speedcalc/feedratecalc.htm> , diakses tanggal 25 Juni 2012 pada pukul 19.18 WIB
- [16] http://www.cnczone.com/forums/benchttop_machines/122918-copper_feed_speed_calculations.html , diakses tanggal 25 juni 2012 pada pukul 19.24 WIB
- [17] Dormer miling nomenclature, halaman 1, 103 – 104
- [18] Siemens NX UG Documentations
- [19] http://www.springerimages.com/Images/RSS/1-10.1007_s00773-008-0033-2-20 , diakses tanggal 25 Juni 2012 pada pukul 19.47 WIB
- [20] Kiswanto, G.,
“The Development of Advanced CAM-system”, Laboratory of Manufacturing Technology, Department of Mechanical Engineering – University of Indonesia.
- [21] SECCO Cutting tools Catalogue
- [22] Motorized Stage catalogue
- [23] Air Driven Spindle Catalogue