

Tuliskan nomor registrasi sirip
(Times New Roman size 11pt, bold,



**LAPORAN HASIL
HIBAH RISET UTAMA
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI
TAHUN 2012**

**Pengembangan Micro-Impeller untuk Micro-Turbine
menggunakan 5-axis Micro-milling**

Nama Ketua : Gandjar Kiswanto
Nama Periset Anggota : Ario S Baskoro
Dede Lia Zariatn

Dibiayai oleh:
Dana Riset Desentralisasi Dikti DIPA UI
Tahun Anggaran 2012
Dengan Kontrak Nomor.....
Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Universitas Indonesia

FAKULTAS TEKNIK
Nopember 2012

**LEMBAR PENGESAHAN
HIBAH RISET UTAMA**

1. Judul riset : Pengembangan Micro-Impeller untuk Micro-Turbine menggunakan 5-axis Micro-milling
2. Jenis hibah : Hibah Riset Utama
3. Periset utama :
- a. Nama lengkap dan gelar akademik : DR. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng
- b. Jenis kelamin : Laki-laki
- c. Pangkat/Golongan/NIP : Lektor Kepala/IIIC/1972204201996091001
- d. Bidang Keahlian : Intelektual Multi-axis milling
- e. Fakultas/Departemen : Teknik/Teknik Mesin
4. Periset utama :

No	Nama Periset	Waktu Riset (jam/pekan)	Pendidikan terakhir	NIP/NUP
1	Gandjar Kiswanto	10	S3	1972204201996091001

5. Periset anggota :

No	Nama Periset	Waktu Riset (jam/pekan)	Pendidikan terakhir	NIP/NUP
1	Dede Lia Zariatini	10	S2	1006751590
2				

- a. Lama riset : 10 bulan
- b. Tahun pendanaan : 2012
- c. Total biaya riset : Rp.....

Depok, 19 November 2012

Menyetujui,
Manajer Riset Fakultas

Periset Utama

Prof. Dr. Ir. Bondan T. Sofyan, MSi.
NIP. 196904211992022001

DR. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng
NIP. 1972204201996091001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, MEng.
NIP. 196107131986021001

Abstrak

Micro-technology adalah jembatan dari Macro-technology menuju Nano-Technology. Dari sekian banyak komponen berukuran micro, salah satu aplikasinya adalah micro-turbine. Micro-turbine dapat mengubah energi gas buang energi listrik sebesar 16 Watt [Jan Peirs et.al, 2004] atau sepuluh kali lebih besar dari daya listrik sebuah baterai dengan massa yang sama [Onera The French Aerospace Lab, 2007]. Komponen tersulit dari micro-turbine adalah micro-impeller. Berbagai teknik pembuatan micro-impeller yang telah dipublikasikan adalah dengan menggunakan 5-micromilling [Lee et.al, 2008] [Yoshimi Takeuchi, 2010], menggunakan EDM [K. Liu, 2008], teknik photolithography dengan ultrathick photoresist (SU-8 3000) [Jan Peirs, 2004], proses LIGA untuk material resin [Nao Honda et.al, 2009], proses mold SDM untuk material silikon nitrida [Sangkyun Kang et.al, 2004]. Dari kelima proses tersebut (5 jurnal dan 1 paten), satu-satunya proses yang dapat menghasilkan blade impeller dengan kontur yang kompleks adalah proses yang menggunakan 5-axis micromilling.

Untuk menghasilkan micro-impeller, harus melalui proses penentuan desain dan model dari micro-impeller, pembuatan modeling dan simulasi toolpath (gerak lintasan pahat) sebelum pada akhirnya dilakukan proses pemesinan. Pada riset ini, dilakukan penentuan desain, pembuatan modeling dan simulasi gerak lintasan pahat dengan dua software CAM System yaitu NURBS (Siemen UGNX) dan PowerMill. Uji eksperimental dilaksanakan pada mesin 5-axis komersial dan mesin 5-axis micromilling yang merupakan hasil pengembangan dari riset sebelumnya.

Empat buah impeller yaitu *twisted blade* berdiameter 54 mm dan 27 mm, *profile blade* datar berdiameter 2 mm dan *inclined blade* berdiameter 2.5 mm berhasil dikembangkan. Hasil menunjukkan kesesuaian antar gerak lintasan pahat kedua software tersebut.

Pada proses pemesinan micro-impeller, pemilihan parameter pemesinan menjadi sangat penting terutama untuk menghindari terbentuknya burr, keausan dini dari micro-tool atau bahkan patahnya micro-tool.

Keywords : micro-impeller, micro-turbine, 5-axis micromilling.

Daftar Isi

Lembar Identitas	
Abstrak	i
Daftar Isi	ii
Daftar Tabel	iv
Daftar Gambar	v
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	4
BAB III. METODE Riset.....	6
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	9
4. 1. Pengembangan mini-impeller dengan diameter 54 mm	9
4.1.1. Desain mili-impeller berdiameter 54 mm.....	9
4.1.2. Pengembangan Lintasan pahat mili-impeller berdiameter 54 mm.....	11
4.1.3. Pengembangan lintasan pahat proses roughing	16
4.1.4. Pengembangan Lintasan Pahat untuk Operasi Proses Finishing Pada Blade Dan Splitter.....	19
4.1.5. Membuat Operasi Proses Finishing Pada Hub	22
4.1.6. Proses Pemesinan Mili-impeller.....	24
4.1.7. Pengecekan kualitas impeller hasil pemesinan.....	26
4. 2. Pengembangan mini-impeller berdiameter 27 mm dari pen-skalaan 1 : 2 mini- impeller berdiameter 54 mm	27
4.2.1. Pengembangan Lintasan pahat untuk proses Roughing mili-impeller berdiameter 27 mm	28
4.2.2. Pengembangan lintasan pahat Blade Finish	31
4.2.3. Pengembangan lintasan pahat Hub finishing.....	33
4.2.4. Proses pemesinan impeller berdiameter 27 mm	35
4.2.5. Pengecekan/pengukuran kualitas mini-impeller hasil pemesinan	36
4. 3. Analisa Pemesinan Mini-impeller	37
4.3.1. Analisa parameter pemesinan mini-impeller.....	37
4.3.2. Analisa waktu pemesinan	37
4.3.3. Analisa lintasan pahat mini-impeller	37
4.3.4. Analisa kualitas hasil pemesinan mini-impeller.....	38
4. 4. Micro-impeller berdiameter 2 mm	38
4.4.1. Pengembangan desain model micro-impeller berdiameter 2 mm	39

4.4.2.	Pengembangan lintasan pahat untuk micro-impeller berdiameter 2 mm	40
4.4.3.	Proses pemesinan micro-impeller berdiameter 2 mm	42
4. 5.	Pengembangan inclined micro-impeller berdiamater 2.5 mm.....	44
4.5.1.	Pengembangan desain incline micro-impeller berdiamater 2.5 mm	44
4.5.2.	Pengembangan lintasan pahat untuk inclined micro-impeller.....	44
4.5.3.	Proses pemesinan inclined micro-impeller 2,5 mm.....	46
4. 6.	Analisa Pemesinan Micro-impeller	48
4.6.1.	Analisa Parameter Pemesinan Micro-Impeller.....	48
4.6.2.	Analisa Waktu pemesinan Micro-Impeller.....	48
4.6.3.	Analisa Lintasan Pahat	49
4. 7.	Pemilihan Parameter Pemesinan dengan Kekasaran Permukaan yang terbaik dan dengan burr minimum.....	49
BAB V.	KESIMPULAN.....	64
5. 1.	Kesimpulan.....	64
5. 2.	Saran	64
	Daftar Pustaka.....	65
	Lampiran	
	Lampiran I Pengujian Performa Spindle	

Daftar Tabel

Tabel 4.1 Parameter pemesinan proses roughing impeller diameter 54 mm	17
Tabel 4.2 Parameter pemesinan proses finishing blade impeller diameter 54 mm	20
Tabel 4.3 Parameter pemesinan proses finishing hub impeller diameter 54 mm.....	23
Table 4.4 Parameter pemesinan untuk proses roughing impeller berdiameter 27 mm..	29
Table 4.5 Parameter pemesinan untuk proses finishing	31
Table 4.6 Parameter pemesinan untuk proses Hub finishing	33
Tabel 4.7 Spesifikasi motor penggerak masing-masing sumbu	39
Tabel 4.8 Parameter pemesinan proses roughing micro-impeller diameter 2 mm	40
Tabel 4.9 Parameter pemesinan proses finishing micro-impeller diameter 2 mm	41
Tabel 4.10 Parameter pemesinan proses roughing inclined micro-impeller diameter 2.5 mm	45
Tabel 4.11 Parameter pemesinan proses finishing micro-impeller diameter 2.5 mm....	46
Tabel 4.12 Referensi parameter pemesinan yang telah dilakukan untuk benda kerja aluminium dengan diameter tool 0.2 mm	49
Tabel 4.13. Penentuan feed-rate berdasarkan rekomendasi produsen pahat.....	51
Tabel 4.14. Parameter pemesinan.....	52
Tabel 4.15. Hasil pengukuran nilai kekasaran permukaan (Ra).....	53
Tabel 4.16. Spesifikasi tool.....	60

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Impeller yang dimanufaktur menggunakan 5-axis micromilling. b. Model yang digunakan [Lee et.al, 2008]	1
Gambar 1.2. Micro-Turbin [Onera The French Aerospace Lab, 2007]	1
Gambar 1.3. Roadmap Riset	2
Gambar 2.1. (a). Mikro-milling 5-axis (b) Mikro-milling 5-axis dengan sistem pengontrolan.....	5
Gambar 3.1. Tahapan Perencanaan dan Pembuatan Micro-impeller.....	6
Gambar 3.2 Persamaan inverse kinematik untuk 5-axis micro-milling	7
Gambar 3.3 Bagan Alir Riset	8
Gambar 4.1. Konstruksi dari <i>twisted</i> impeller	9
Gambar 4.2. Skema urutan tahap desain <i>twisted impeller</i>	10
Gambar 4.3. Desain dari mili- <i>impeller</i> berdiameter 54 mm.....	10
Gambar 4.4. Parameter pemesinan dari proses milling.....	12
Gambar 4.5. Pengembangan lintasan pahat mili- <i>impeller</i>	12
Gambar 4.6 <i>Pendefinisian part dan blank material</i>	13
Gambar 4.7. Pendefinisian bagian pada impeller.....	13
Gambar 4.8. Spesifikasi cutting tool	14
Gambar 4.9. Pendefinisian level dan set pada Powermill	14
Gambar 4.10. Pendefinisian block.....	15
Gambar 4.11 Pendefinisian cutting tool beserta shank dan holder	16
Gambar 4.12 Strategi proses roughing, layer awal (kiri) dan layer akhir (kanan)	16
Gambar 4.13 Lintasan pahat roughing untuk satu bagian dan untuk semua bagian dari impeller.....	17
Gambar 4.14 Simulasi proses roughing impeller pada software NX.....	18
Gambar 4.15. Lintasan pahat pada proses roughing dengan Powermill	18
Gambar 4.16. Simulasi proses <i>roughing impeller</i> pada <i>software</i> Powermill	19
Gambar 4.17 Strategi proses <i>finishing blade</i> , tampak depan (kiri) dan tampak belakang (kanan) pada impeller berdiameter 54 mm	19
Gambar 4.18 Program <i>finishing blade</i> untuk satu bagian (a) dan untuk semua bagian (b) pada <i>impeller</i> berdiameter 54 mm.....	20
Gambar 4.19. Gambar <i>finishing splitter</i> untuk satu <i>splitter</i> (a) dan untuk semua <i>splitter</i> (b)	21
Gambar 4.20. Simulasi proses <i>finishing blade impeller</i> pada <i>software</i> NX	21
Gambar 4.21. Lintasan pahat pada proses finishing blade dan splitter dengan Software Powermill	22
Gambar 4.22. Simulasi proses <i>finishing blade impeller</i> diameter 54 mm pada <i>software</i> Powermill	22
Gambar 4.23 Strategi proses finishing hub pada impeller berdiameter 54 mm	22
Gambar 4.24 Proses finishing hub untuk satu bagian (a) dan semua bagian (b).....	23
Gambar 4.25 Simulasi proses <i>finishing hub impeller</i> pada <i>software</i> NX.....	23
Gambar 4.26. Lintasan pahat pada proses <i>finishing hub</i>	24

Gambar 4.27 Simulasi proses <i>finishing hub impeller</i> dengan <i>software</i> Powermill.....	24
Gambar 4.28. DMU DMG 50 Evolution Linear Machine Tool [5].....	25
Gambar 4.29 Alur proses pemesinan impeller dengan diameter 54 mm diameter.....	25
Gambar 4.30 Hasil proses pemesinan impeller dengan diameter 54 mm.....	26
Gambar 4.31. CMM Mitutoyo Crysta-Plus M443 [7].....	26
Gambar 4.32 Alur pengecekin kualitas impeller hasil pemesinan.....	26
Gambar 4.33 Titik-titik pengukuran dari impeller berdiameter 54 mm	27
Gambar 4.34 Titik-titik koordinat hasil pengukuran.....	27
Gambar 4.35 Komparasi antara model hasil pengukuran CMM dengan desain awal...	27
Gambar 4.36 Alur urutan pen-skalaan pada <i>software</i> NX.....	28
Gambar 4.37 Layer pertama pada proses roughing untuk impeller berdiameter 27 mm	29
Gambar 4.38 Layer kedua dari strategi proses roughing impeller berdiameter 27 mm.	29
Gambar 4.39 Lintasan pahat proses roughing impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (jarak antara blade) (a) dan untuk seluruh bagian (b).....	30
Gambar 4.40 Simulasi proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software NX	30
Gambar 4.41 Lintasan pahat proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software Powermill.....	30
Gambar 4.42 Simulasi proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software Powermill.....	31
Gambar 4.43 finishing process strategy (front view) of 27mm diameter impeller	31
Gambar 4.44 <i>Blade finishing process strategy (rear view) of 27mm diameter impeller</i>	32
Gambar 4.45 Lintasan pahat proses Blade finishing untuk impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (daerah antara blade) (a) dan untuk semua bagian..	32
Gambar 4.46 Simulasi proses Blade finishing untuk blade berdiameter 27 mm menggunakan software NX.....	32
Gambar 4.47 Lintasan pahat proses blade finishing impeller berdiameter 27 mm	33
Gambar 4.48 Simulasi proses Blade finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan software Powermill	33
Gambar 4.49 Strategi proses Hub finishing untuk impeller berdiameter 27 mm	34
Gambar 4.50 Lintasan pahat Hub finishing impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (a) dan untuk semua bagian (b) menggunakan software NX.....	34
Gambar 4.51 Simulasi Hub finishing process impeller berdiameter 27 mm dengan software NX	34
Gambar 4.52 Lintasan pahat proses Hub finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan Powermill.....	35
Gambar 4.53 Verikisai dan simulasi proses Hub finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan Powermill.....	35
Gambar 4.54 Alur proses pemesinan impeller dengan diameter 27 mm.....	35
Gambar 4.55 <i>The machined 27 mm diameter impeller</i>	36

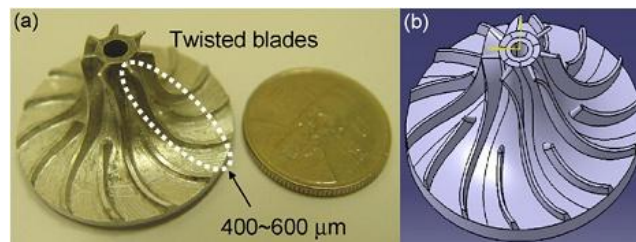
Gambar 4.56 Pengukuran titik-titik koordinat dari impeller berdiameter 27 mm.....	36
Gambar 4.57 Titik-titik koordinat hasil pengukuran	36
Gambar 4.58 Komparasi antara model hasil CMM dan desain awal	37
Gambar 4.59 (a). 5-axis micromilling(b) 5-axis micromilling dengan sistem pengontrolan.....	39
Gambar 4.60 Desain model micro-impeller dengan diameter 2 mm.....	40
Gambar 4.61 Lintasan pahat proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm.....	41
Gambar 4.62 Simulasi proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm.....	42
Gambar 4.63 Lintasan pahat proses finishing blade micro-impeller berdiameter 2mm	42
Gambar4.64 Simulasi proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm.....	42
Gambar 4.65 Lintasan pahat proses finishing surface micro-impeller berdiameter 2 mm.....	43
Gambar 4.66 Skema alur proses pemesinan micro-impeller berdiameter 2 mm.....	43
Gambar 4.67 Micro-impeller berdiameter 2 mm.....	44
Gambar 4.68 Desain micro-impeller 2.5 mm dengan kemiringan blade sebesar	44
Gambar 4.69 Lintasan pahat proses roughing inclined micro-impeller berdiameter 2.5 mm.....	45
Gambar 4.70 Simulasi proses roughing inclined micro-impeller berdiameter 2 mm....	46
Gambar 4.71 Lintasan pahat proses finishing blade micro-impeller berdiameter 2 mm	47
Gambar 4.72 Inverse kinematik dari Machine Coordinate System terhadap Workpiece Coordinate System	47
Gambar 4.73. Dimensi Micro-milling machine untuk penghitungan panjang Lt (dalam mm).....	48
Gambar 4.74. Persamaan perhitungan parameter pemesinan untuk proses milling.....	50
Gambar 4.75. Dimensi pahat SECO 905002 Mega-T.....	50
Gambar 4.76. Parameter pemesinan yang direkomendasikan.....	51
Gambar 4.77. Desain micro-channel.....	52
Gambar 4.78. Tampilan hasil perhitungan General Regression Analysis.....	53
Gambar 4.79. Residual Plots terhadap kekasaran permukaan (Ra).....	54
Gambar 4.80. Main effect plot terhadap kekasaran permukaan (Ra).....	55
Gambar 4.81. Perhitungan Genearl Linear Model menggunakan Perangkat lunak statistik	55
Gambar 4.82. Interaction Plot untuk kekasaran permukaan (Ra).....	56
Gambar 4.83 Tipe-tipe burr berdasarkan posisi pembentukannya.....	56
Gambar 4.84. Pembentukan top burr pada micro-channel.....	57
Gambar 4.85. (a) Pandangan samping dari micro-channel (b) Exit Side Burr yang terbentuk pada bagian sisi dari micro-channel	57
Gambar 4.86. Padangan atas dari micro-channel untuk setiap parameter pemesinan....	58
Gambar 4.87. Kondisi pahat setelah 45 menit (a) feed-rate 0.05 mm/s (b) feed-rate 0.5 mm/s (c) feed-rate 1 mm/s.....	58
Gambar 4.88.(a) Geram yang kontinyu pada proses pemesinan dengan feed-rate 0.05 mm/s (b) Proses pemesinan dengan feed-rate 1mm/s.....	59

Gambar 4.89. Potongan terakhir dari pemesinan micro-channel.....	59
Gambar 4.90. Permukaan dasar dari micro-channel; (a) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 0.05 mm/s; (b) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 0.5 mm/s; (c) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 1 mm/s; (d) Geram yang tergerus oleh tool.....	60
Gambar 4.91. Hasil Pemesinan Slot milling (a) MEGA-T coated (b) nACro coated....	61
Gambar 4.92. Burr yang terbentuk menggunakan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 0.05 mm/s.....	61
Gambar 4.93. Burr yang terbentuk menggunakan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 0.5 mm/s	62
Gambar 4.94. Pembentukan burr dengan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 1 mm/s	62
Gambar 4.95. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 0.05 mm/s	62
Gambar 4.96. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 0.5 mm/s	63
Gambar 4.97. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 1 mm/s	63

BAB I. PENDAHULUAN

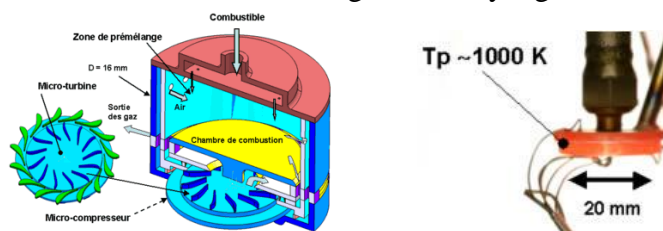
Tuntutan perkembangan teknologi terhadap produk/komponen micro bahkan nano saat ini semakin meningkat, sebagai contoh MEMS (micro-electric-mechanical system), komponen medical implant, micro-reaktor, mikro/nano sensor dan aktuator serta masih banyak lagi, yang diaplikasi pada bidang telekomunikasi, pertahanan, aplikasi rumah tangga, biomedik otomotif dan sebagainya. Untuk menghasilkan komponen berukuran micro tersebut, harus dilakukan dengan menggunakan teknologi micro-manufacturing yang sesuai, antara lain teknik seperti photolithography, chemical etching, plating, LIGA, laser ablation (MEMS manufacturing) atau dengan menggunakan teknik non-MEMS manufacturing seperti EDM, micro-mechanical cutting, Laser cutting, micro-embossing, micro-injection molding, micro-extrusion, micro-stamping dan sebagainya. Teknologi micro-manufacturing tersebut merupakan jembatan menuju teknologi nano-manufacturing.

Salah satu contoh komponen mikro yang sulit di manufaktur adalah impeller. Kesulitan tersebut dikarenakan bentuk blade yang kompleks dan dimensi yang sangat tipis, kurang dari $600\mu\text{m}$. Seperti terlihat pada Gambar 1.1, berikut ini.



Gambar 1.1 Impeller yang dimanufaktur menggunakan 5-axis micromilling. b. Model yang digunakan [Lee et.al, 2008]

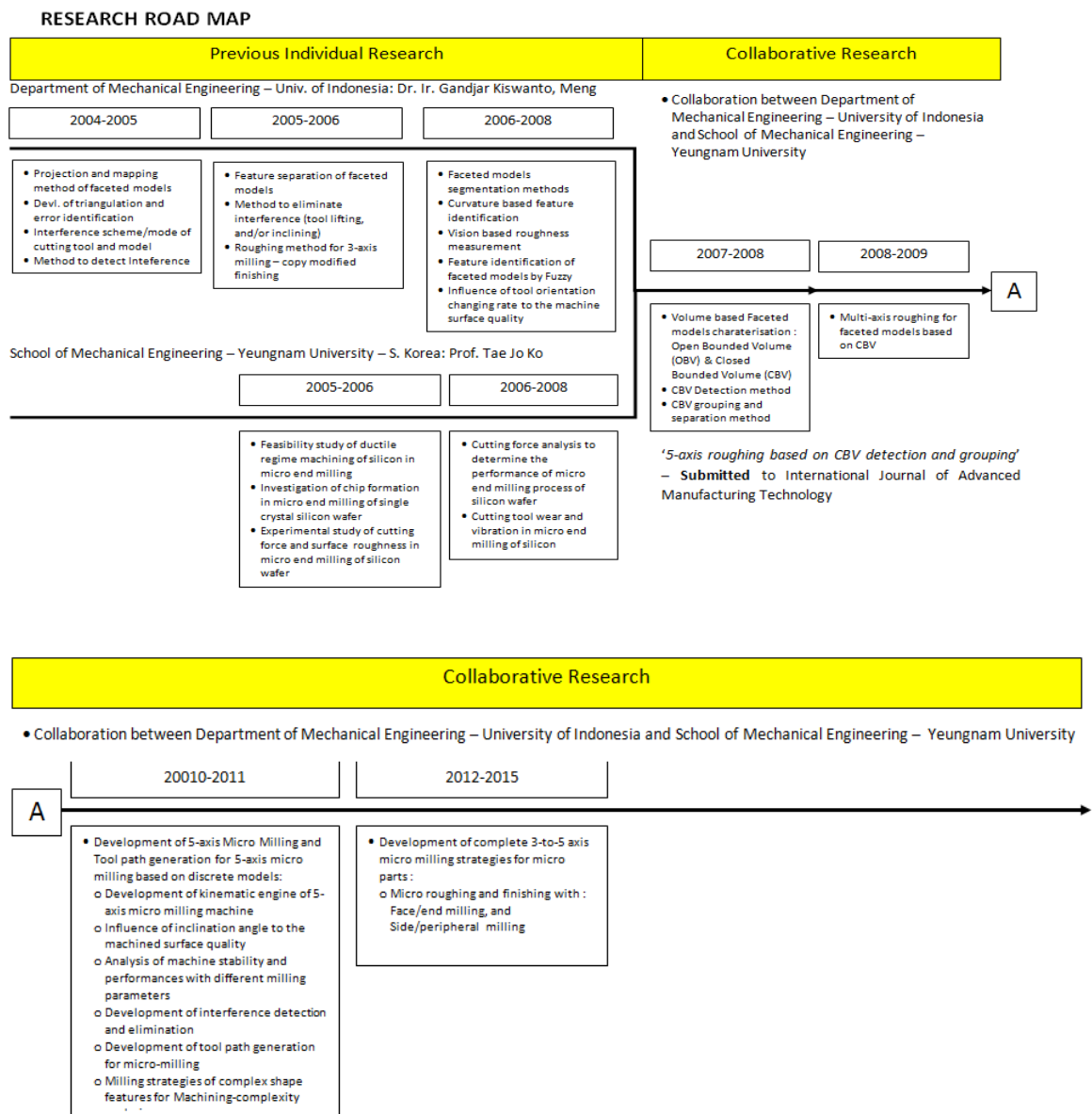
Impeller yang direncanakan akan digunakan sebagai implier pada suatu micro-turbine. Micro-turbine adalah suatu turbin berdimensi micro yang mengubah gerak mekanik menjadi energi listrik, dari penelitian yang dilakukan pada Onera The French Aerospace Lab, diketahui bahwa micro-turbine dapat menghasilkan daya 10 kali lebih besar dari sebuah baterai dengan massa yang sama.



Gambar 1.2. Micro-Turbin [Onera The French Aerospace Lab, 2007]

Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Jan Peirs et.al [Jan Peirs et.al , 2004] berhasil mengembangkan micro-turbin yang mampu menghasilkan tenaga listrik sebesar 16 W, dengan menggunakan single-stage axial microturbine dengan diameter 10 mm.

Riset ini merupakan salah satu rangkaian dari riset yang telah dilakukan sebelumnya. Roadmap dari rangkaian riset seperti terlihat pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3. Roadmap Riset (Lanjutan)

Penelitian tentang 5-axis micromilling masih sedikit ditemukan [Dehong Huo et al., 2010] [Young-bong Bang et al., 2005] [Bohez, 2005] [Lavernhe et al., 2006,

2008] [M. Sharif Uddin et al., 2009] [Lamikiz et al., 2008]. sedangkan dari beberapa literatur tentang micromilling, baik 3-axis maupun 5-axis, hanya bentuk-bentuk komponen sederhana yang telah dibuat seperti thin ribs [Li et al., 2010], thin walled [Kersting et al., 2010] [Seguy et al. 2008] namun hanya dua jurnal yang telah berhasil membuat bentuk kompleks berupa micro-impeller, dengan menggunakan micro-machining [Lee et.al, 2008] dan dengan menggunakan EDM [K. Liu, 2008].

Kerumitan untuk menghasilkan suatu micro-impeller dan masih sedikitnya literatur yang membahas tentang bentuk kontur yang kompleks berukuran mikro dengan menggunakan 5-axis micromilling menjadikannya tema menarik untuk diteliti. Selain itu, riset ini juga sebagai suatu verifikasi akan performa dari 5-axis micromilling yang telah dikembangkan pada riset sebelumnya.

Diharapkan melalui riset ini, **mampu memproduksi micro-impeller untuk mengembangkan micro turbin dengan ukuran diameter kurang dari 10 mm dan dengan ketelitian 0,5 μm , menggunakan 5-axis micromilling yang telah berhasil dikembangkan dari hasil riset sebelumnya.**

Keutamaan dari riset ini dapat dilihat dari beberapa aspek antara lain :

a. Aspek teknologi terkini.

Teknologi micromilling semakin berkembang. Di beberapa negara maju masih terus dilakukan banyak penelitian terkait teknologi berdimensi micro ini. Namun, tercatat masih sedikit jurnal yang dipublikasikan terkait micro-impeller pada micro-turbine. Hal inilah yang menjadikan riset ini sangat penting.

b. Aspek efisiensi energi.

Dengan micro-impeller yang dihasilkan dari riset ini, digunakan untuk mengembangkan suatu micro-turbine yang memanfaatkan kembali gas buang hasil pembakaran, energi bayu atau sumber energi lain, untuk memutar turbin dan menghasilkan energi listrik. Dengan meningkatkan efisiensi energi maka akan turut berpengaruh pada aspek ekonomi. Selain dari, penghematan bahan bakar fosil, hal ini juga dapat mengurangi efek pemanasan global .

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Masih sedikitnya publikasi riset tentang pengembangan micro-impeller membuka suatu kesempatan novelty di bidang micro-manufacturing. Beberapa teknologi yang pernah dipublikasikan untuk menghasilkan micro-impeller antara lain adalah dengan menggunakan 5-micromilling [Lee et.al, 2008] [Yoshimi Takeuchi, 2010], menggunakan EDM [K. Liu, 2008], menggunakan teknik photolithography dengan ultrathick photoresist (SU-8 3000) [Jan Peirs, 2004], dengan menggunakan proses LIGA untuk material resin [Nao Honda et.al, 2009], menggunakan proses mold SDM untuk material silikon nitrida [Sangkyun Kang et.al, 2004]. Dari kelima proses tersebut (5 jurnal dan 1 paten), satu-satunya proses yang dapat menghasilkan blade impeller dengan kontur yang kompleks adalah proses yang menggunakan 5-axis micromilling.

5-axis micromilling adalah salah satu jenis dari mesin CNC yang memiliki lima sumbu gerak. Mesin lima sumbu (5-axis) dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah sumbu translasi dan rotasi, yang terbagi atas empat grup : 1. tiga sumbu translasi dan dua sumbu putar, 2. dua sumbu translasi dan tiga sumbu putar, 3. satu sumbu translasi dan empat sumbu putar, 4. lima sumbu putar. Namun, jenis mesin lima sumbu yang banyak digunakan adalah mesin dengan tiga sumbu translasi dan dua sumbu putar (grup 1). [Stanislav S. Makhanov and Weerachai Anotaiapaiboon, 2007].

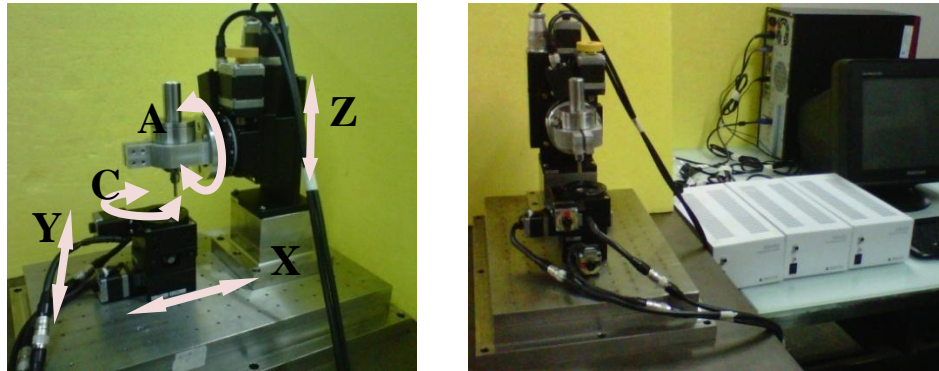
Untuk menghasilkan micro-impeller dengan tingkat kepresisian yang diinginkan, terdapat beberapa parameter yang akan mempengaruhi hasil pemesinan, yaitu kecepatan spindle, feed rate, depth of cut dan gaya pemotongan [W.Wang et al.2005] [Cheng-Zhe Jin et al., 2009] [Biermann et al., 2009] [Burton et al., 2004] [Jun et al., 2007]

Selain itu, faktor lain yang mempengaruhi hasil pemesinan dari 5-axis micromilling adalah material pahat [Ozdoganlar & Filiz] [Son et al., 2003] [Torres et al., 2009] dan geometri pahat [Fleischer et al., 2008] [Cheng et al.2009] serta karakteristik yang unik dari pahat akibat efek scalling down [Weinert et al.,2003]. Dari hasil studi literatur diketahui bahwa software komersial CAM yang ada saat ini, tidak dapat memenuhi keakurasian pada tingkat tertentu jika digunakan untuk men-generate lintasan pahat produk yang berukuran mikro [E. Brinksmeier, 2008].

Dua hal utama yang diperlukan dan telah dikembangkan pada riset sebelumnya, untuk menghasilkan micro-impeller dengan proses micromilling adalah :

a. Mesin 5-axis micromilling,

5-axis micromilling yang telah dikembangkan melalui Hibah Kolaborasi Internasional 2010 – 2012 bersama YeungNam University, memiliki 3 sumbu gerak translasi XYZ dan dua sumbu putar AC, dimana sumbu A berputar terhadap sumbu X dan sumbu C berputaran terhadap sumbu Z.



(a)

(b)

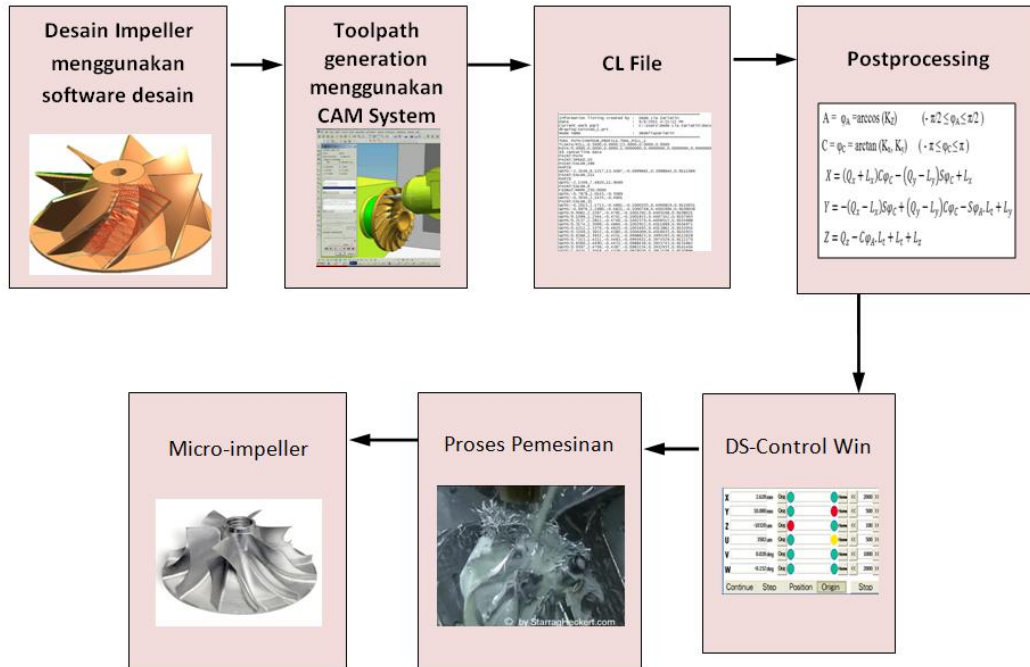
Gambar 2.1. (a). Mikro-milling 5-axis (b) Mikro-milling 5-axis dengan sistem pengontrolan.

Masing-masing sumbu digerakkan oleh motor stepper yang di kontrol dengan DS102 dan sebuah PC menggunakan perangkat lunak DSControl-Win. Proses pemesinan dan uji eksperimental dari pembuatan micro-impeller dilakukan pada 5-axis micromilling seperti terlihat pada Gambar 2.1.

- b. Mekanisme toolpath generation atau gerak lintasan pahat, untuk dapat menghasilkan kontur yang diinginkan. Seperti telah dijelaskan oleh E. Brinksmeier et al, CAM system komersil yang umumnya menggunakan NURBS, tidak cocok untuk men-generate lintasan pahat pada mesin presisi (contohnya *micromilling*) karena terdapat kekurangan terhadap kinematika dari mesin presisi [E. Brinksmeier et al., 2008].

BAB III. METODE RISET

Dengan menggunakan 5-axis micromilling, berbagai bentuk dengan kontur yang kompleks akan dapat dimanufaktur. Langkah-langkah proses perencanaan dan pembuatan micro-impeller dengan menggunakan 5-axis micromilling adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1. Tahapan Perencanaan dan Pembuatan Micro-impeller.

Adapun tahapan dari riset ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur, untuk mendapatkan informasi dan data yang diperlukan dalam mengembangkan micro-impeller untuk micro-turbine. Informasi tersebut antara lain, seperti bentuk dan dimensi terbaik dari micro-impeller agar menghasilkan daya yang efektif, parameter-parameter pemotongan yang ditetapkan agar didapat hasil pemesinan sesuai dengan keakurasian yang diinginkan, strategi pemesinan yang harus diambil agar proses pemotongan efektif, terhindar dari benturan dan gouging. Serta, informasi tambahan lainnya yang dibutuhkan selama riset berlangsung.
2. Desain dan Model Micro-impeller
 Penentuan desain didasarkan pada studi literatur dan *bench marking* terhadap micro-impeller yang dibutuhkan oleh micro-turbine. Kebutuhan desain meliputi diameter micro-impeller, jumlah, bentuk, dimensi dan kemiringan blade, jarak antar blade dan ukuran lain yang diperlukan. Desain micro-impeller akan dimodelkan pada suatu software desain, dalam hal ini adalah Siemen UGNX.

3. Modelling dan Simulasi Gerak Pemotongan

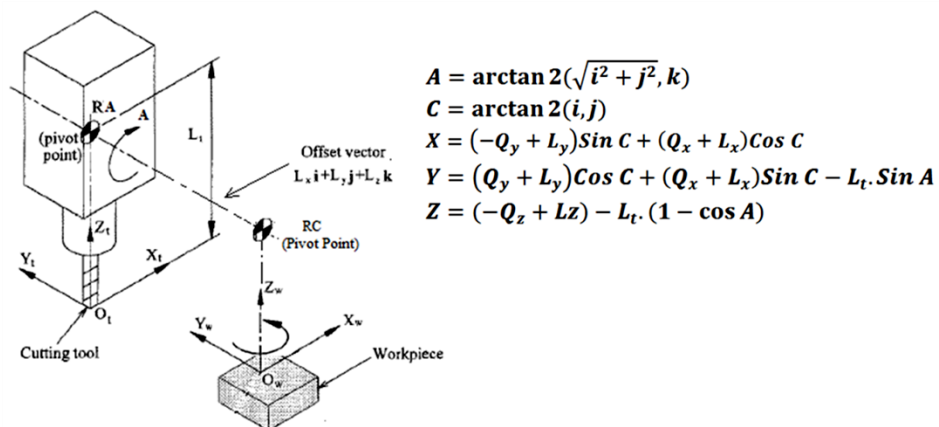
Memodelkan dan mensimulasikan gerak pemotongan dari pahat untuk dengan menggunakan dua metode. Yang pertama adalah metode NURBS, yaitu dengan menggunakan CAM System yang tersedia di pasaran, sebagai contoh Siemen UGNX. Sedangkan metode yang kedua adalah dengan menggunakan PowerMill. Hasil analisa komparasi ini diharapkan dapat dipublikasikan pada sebuah jurnal internasional.

Dari pemodelan ini akan di dapatkan CL File yang akan diolah selanjutnya oleh postprocessing untuk menghasilkan titik-titik koordinat pergerakan dari pahat.

4. Postporcessing dan Penentuan input untuk DSControl-Win

Untuk mentransformasikan gerak dari desain mikro-milling 5-axis di atas, maka tiap titik dari Sistem Koordinat Mesin (*Machine Coordinate System/MCS*) harus ditransformasikan menjadi Sistem Koordinat Pahat (*Tools Coordinate System/TCS*) dan Sistem Koordinat Benda Kerja (*Workpiece Coordinate System/WCS*), dimana tiap titik tersebut bergerak sepanjang sistem koordinat sebagai suatu vektor axis. Perpotongan antar TCS dan WCS akan mengakibatkan proses permesian. Titik perpotongan ini disebut *Cutter Contact (CC)* poin. Dari CC poin dapat ditentukan *Cutter Location (CL)* poin, yang dapat di-generate menggunakan CAM Sistem yang tersedia. Namun, untuk mentransformasikan CL poin tersebut menjadi pergerakan dari mesin 5-axis, desain *kinematic engine* dari mikro-milling 5-axis haruslah dibuat.

Dari hasil riset sebelumnya, diketahui persamaan untuk 5-axis micro-milling yang dikembangkan adalah sebagai berikut :

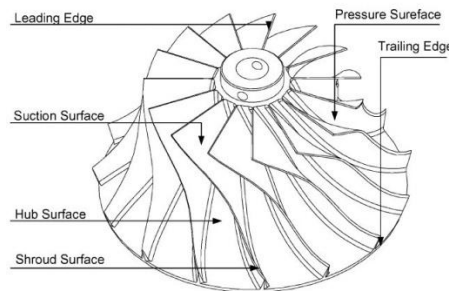


Gambar 3.2 Persamaan inverse kinematik untuk 5-axis micro-milling

Dimana Titik vektor dari titik tengah pahat potong dituliskan sebagai $[Q_x \ Q_y \ Q_z \ 1]^T$, sementara vektor axis pahat adalah $[i \ j \ k \ 0]^T$, A dan C adalah

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa turbin akan sangat dipengaruhi oleh parameter geometri dan kondisi operasi dari impeller. Sehingga, impeller adalah komponen esensial dan komponen paling rumit dari sebuah turbin. Bentuk impeller sangat tergantung dari bentuk dari blade. Blade dari impeller dapat berbentuk lurus, *inclined* atau *twisted*. Salah satu contoh impeller dengan bentuk *twisted* adalah seperti terlihat pada Gambar 4.1, berikut ini.



Gambar 4.1. Konstruksi dari *twisted* impeller

5. 1. Pengembangan mini-impeller dengan diameter 54 mm

Untuk dapat mengetahui kemampuan desain untuk men-generate lintasan pahat *twisted impeller* dan untuk mengetahui kemampuan dari 5-axis milling machine dalam menghasilkan impeller berukuran kecil, maka pada riset ini terlebih dahulu dilakukan pengembangan mili-impeller berdiameter 54 mm.

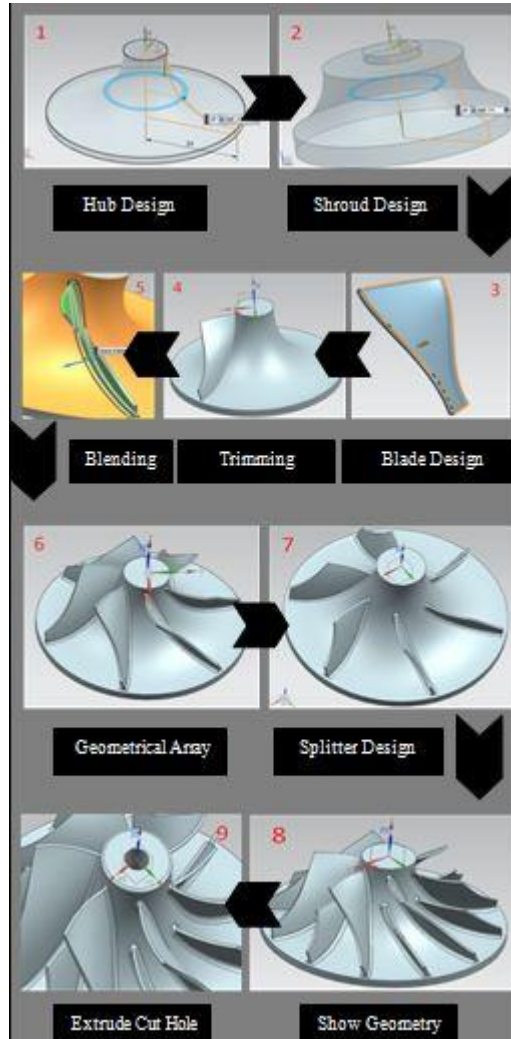
4. 1. 1. Desain mili-impeller berdiameter 54 mm

Pengembangan desain *twisted impeller* yang memiliki *splitters*, dilakukan dengan menggunakan *Computer Aided Design (CAD) software* Siemen NX8 PLM. Urutan proses pengembangan desain impeller secara berurut adalah *hub modeling*, *shroud modeling*, *blade modeling*, *blade forming*, *blend process*, *geometry array*, *splitter modeling*, *geometry appearance*, dan *centre-section impeller hole-making*. Skema dari urutan tahap desain adalah seperti terlihat pada Gambar 2.2. Terdapat dua fasilitas modeling yang tersedia pada Siemen NX8 PLM yaitu *solid modeling* dan *surface modeling*. *Solid modeling* digunakan pada proses modeling 1, 2 dan 9, sementara *surface modeling* digunakan untuk urutan ke 3, 4 dan 7.

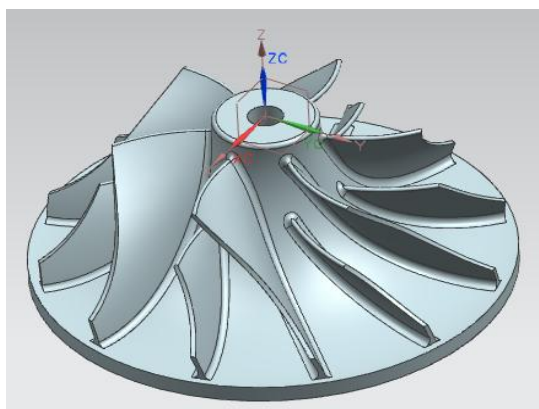
Hasil akhir dari desain impeller seperti terlihat pada Gambar 4.3 dengan dimensi sebagai berikut :

- Diameter *impeller* : 54 mm
- Tinggi *impeller* : 22 mm
- Tebal *blade* : 0.6 mm

- Jarak minimum antara *blade* dengan *splitter* : 3.42 mm
- Jarak minimum antar *blend* : 1.74 mm



Gambar 4.2. Skema urutan tahap desain *twisted impeller*



Gambar 4.3. Desain dari mili-*impeller* berdiameter 54 mm

4. 1. 2. Pengembangan Lintasan pahat mili-impeller berdiameter 54 mm

Langkah berikutnya adalah mengembangkan lintasan pahat dan menentukan parameter pemesinan untuk desain *impeller* yang telah dibuat. Pengembangan lintasan pahat dapat dilakukan dengan bantuan *software Computer Aided Manufacturing (CAM)*. *Software* Siemen NX8 PLM adalah *software* CAD/CAM yang terintegrasi, sehingga pengembangan lintasan pahat dan simulasinya dapat langsung dilakukan dengan menggunakan *software* tersebut. Di sisi lain, terdapat beberapa *software* CAM yang tidak terintegrasi dengan sistem CAD, salah satu contohnya adalah *software* Powermill. Kemudahan pertukaran data adalah keuntungan utama dan tujuan dari perangkat lunak CAD / CAM terintegrasi, sementara sistem yang tidak terintegrasi biasanya menawarkan antarmuka pengguna yang lebih baik. Pada riset ini, lintasan pahat hasil sistem CAM terintegrasi pada Siemen NX8 PLM akan divalidasi dengan lintasan pahat yang dihasilkan oleh sistem CAM yang tidak terintegrasi dari Powermill.

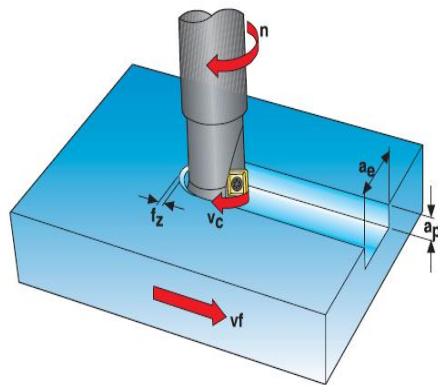
Parameter pemesinan dari proses yang akan direncanakan harus ditentukan terlebih dahulu pada saat pengembangan lintasan pahat. Terdapat dua tipe parameter pemesinan yaitu parameter bebas/independen dan parameter terikat/dependen. Parameter independen adalah parameter yang dapat diatur dan berdiri sendiri atau tidak tergantung dengan parameter lainnya, sementara parameter dependen adalah parameter yang tergantung terhadap parameter independen. Contoh dari independen parameter adalah *spindle speed* (n), diameter tool (D), *feed rate* (V_f), *number of teeth* (Z_c) *step over* (a_e), dan *depth of cut* (a_p). Berdasarkan parameter tersebut, akan diperoleh parameter dependen seperti *cutting speed* (v_c), *feed per tooth* (f_z), *material removal rate* (Q), dan waktu pemesinan (T_c), serta panjang pemotongan (L) yang dapat diperoleh menggunakan kalkulasi *software*. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung parameter dependen pemesinan untuk operasi milling.

$$\text{Cutting speed :} \quad v_c = \pi \cdot D \cdot n \text{ (mm/min)} \quad (1)$$

$$\text{Feed per tooth :} \quad f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \text{ (mm/tooth)} \quad (2)$$

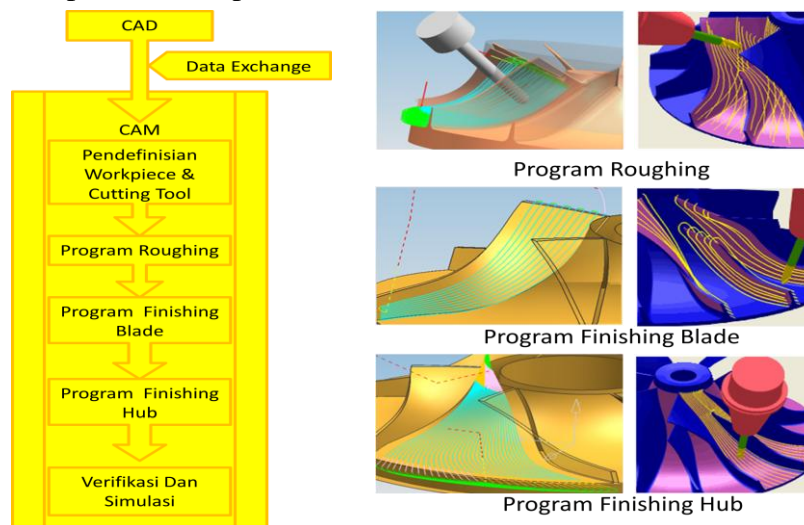
$$\text{Material removal rate :} \quad Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f \text{ (mm}^3\text{/min)} \quad (3)$$

$$\text{Waktu Pemesinan :} \quad T_c = \frac{L}{v_f} \text{ (min)} \quad (4)$$



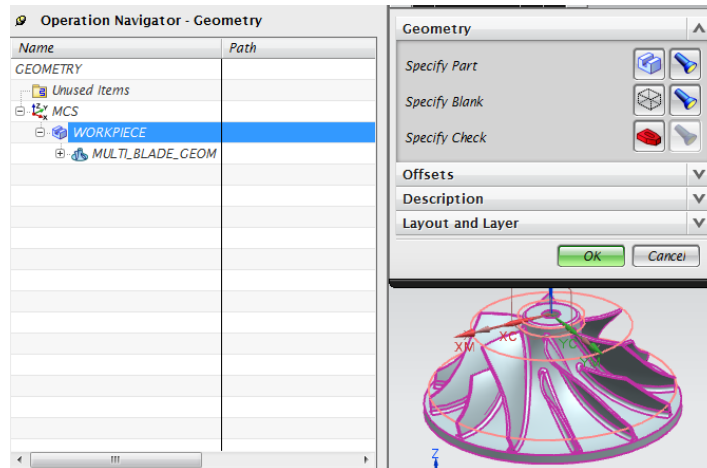
Gambar 4.4. Parameter pemesinan dari proses milling

Secara umum, pengembangan lintasan pahat dilakukan melalui 3 tahap proses pemesinan yaitu proses *roughing*, proses *blade finishing* dan proses *hub finishing*. Alur proses seperti terlihat pada Gambar 4.5.

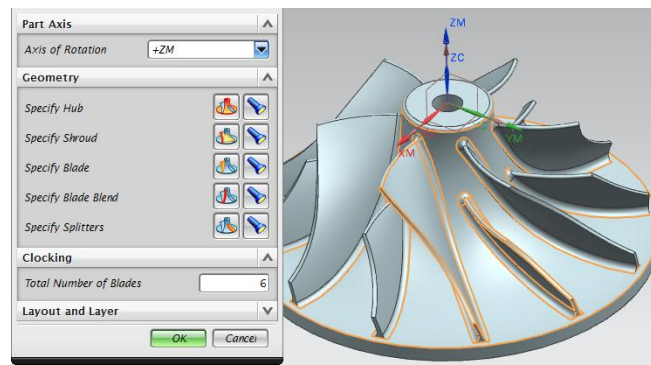


Gambar 4.5. Pengembangan lintasan pahat mili-impeller

Penentuan *workpiece* adalah hal pertama yang perlu dilakukan agar dapat menjalankan proses simulasi. *Workpiece* harus didefinisikan dalam beberapa bagian. Bagian-bagian tersebut sama dengan apa yang telah digambar pada saat pemodelan. Bagian pertama yang didefinisikan adalah keseluruhan komponen yang akan dibuat yaitu impeller seutuhnya. Kedua, adalah blank material yang berfungsi sebagai raw material dari benda yang akan dibuat. Setelah itu, bagian-bagian lain didefinisikan agar program simulasi dapat membaca dan memperhitungkan lintasan pahat yang akan dilalui oleh cutting tool. Gambar 4.6 adalah gambar pendefinisian workpiece pada software NX.

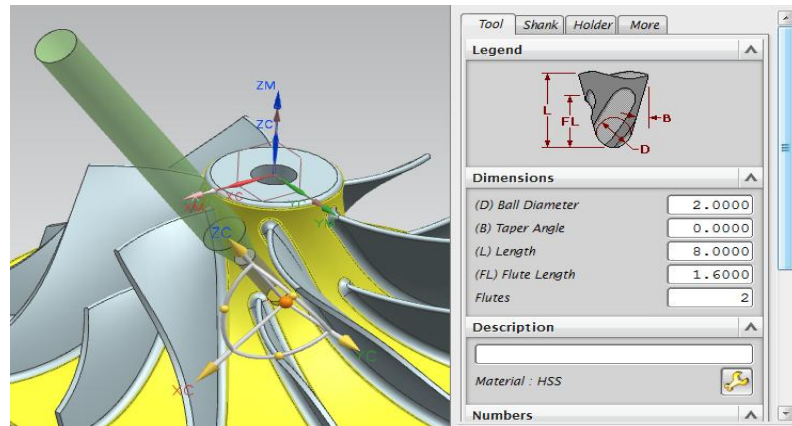


Gambar 4.6 Pendefinisian part dan blank material



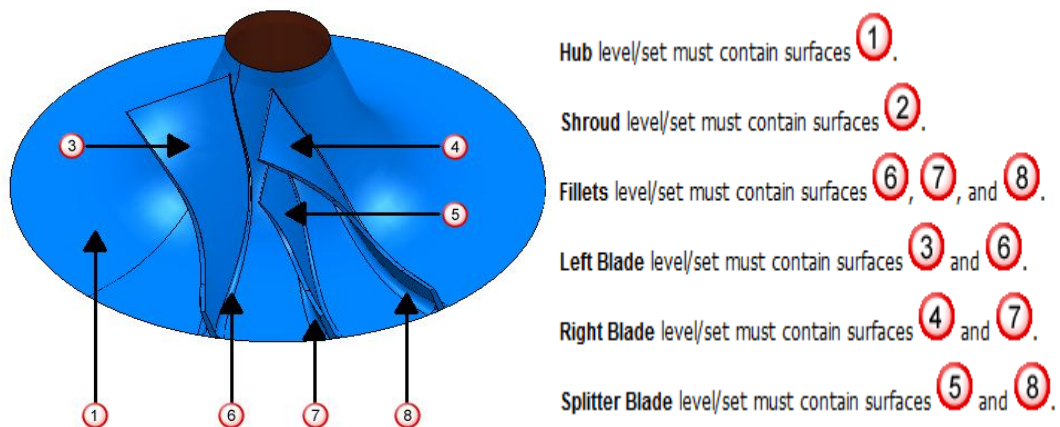
Gambar 4.7. Pendefinisian bagian pada impeller

Setelah penentuan workpiece selesai, penentuan cutting tool dilakukan. Tipe, ukuran, dan material dari cutting tool ditentukan berdasarkan spesifikasi dari katalog. Dalam penelitian ini, merk cutting tool yang digunakan adalah Boo Young Cutting tool dengan tipe SKRB (*long neck ball end mills*). Cutting tool yang digunakan bertipe ball end mill baik yang digunakan pada saat *roughing* maupun saat *finishing*. Berikut adalah spesifikasi dari *cutting tool* yang digunakan.



Gambar 4.8. Spesifikasi cutting tool

Pada *software* Powermill, fitur yang digunakan untuk mendefinisikan bagian-bagian dari model adalah *level and set*. Fitur *level and set* digunakan berdasarkan bagian-bagian yang telah disebutkan sebelumnya. Berikut adalah gambar pendefinisian model dengan menggunakan fitur *level and set*.

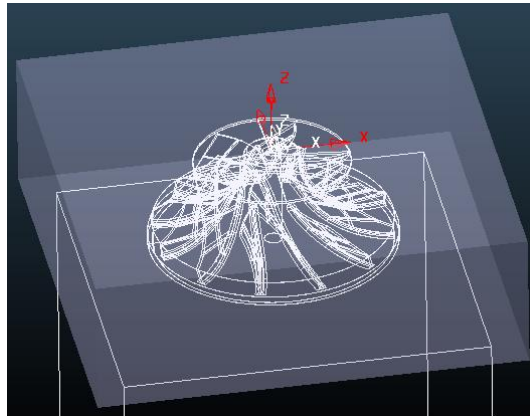


Gambar 4.9. Pendefinisian level dan set pada Powermill [11]

Setelah selesai mendefinisikan model, selanjutnya adalah menentukan *blank material* yang akan digunakan sebagai *raw material* pada proses pemesinan. *Blank material* pada Powermill telah disediakan melalui fitur *block*. *Block* dapat didefinisikan dengan menentukan bentuknya apakah persegi, silinder, segitiga, atau dapat didefinisikan berdasarkan *boundary*-nya. Ukuran *block* juga dapat diatur besarnya berdasarkan material jadi yang diinginkan untuk dibuat.

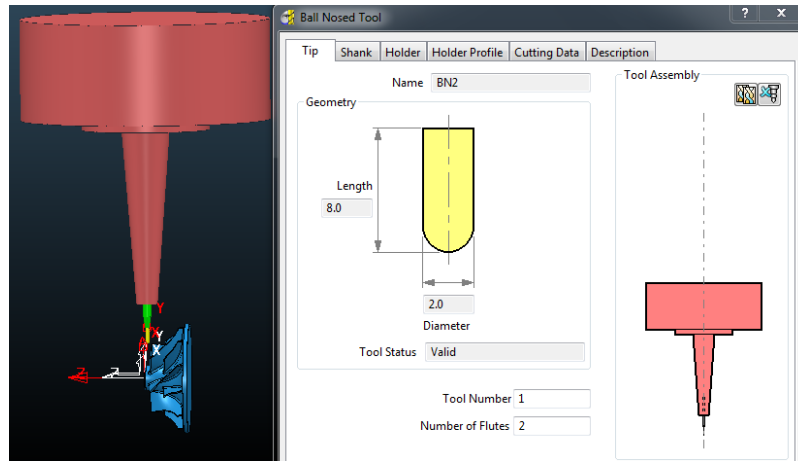
Setelah mendefinisikan *block*, proses selanjutnya adalah menentukan *cutting tool* yang akan digunakan pada proses pemesinan. Proses simulasi pemesinan yang dilakukan pada *software* Powermill sedikit berbeda dengan proses simulasi pemesinan pada *software* NX dikarenakan pada *software* Powermill, data *CL-file* yang didapat akan langsung diproses pada *post processor* untuk mendapatkan lintasan pahat yang akan digunakan pada proses pemesinan yang sebenarnya.

Perbedaan tersebut terletak pada awal simulasi, yaitu adanya proses pemesinan pembuatan lintasan pahat untuk membuat *shroud* terlebih dahulu dari *raw material* yang berbentuk persegi. Hal ini dilakukan karena menyesuaikan dengan *raw material* yang ada saat akan melakukan proses pemesinan. Untuk itu, tidak seperti pada *software* NX, pendefinisian *raw material* dapat dilakukan pada setiap programnya. Berikut adalah pendefinisian *raw material* pada program *roughing* pertama.



Gambar 4.10. Pendefinisian block

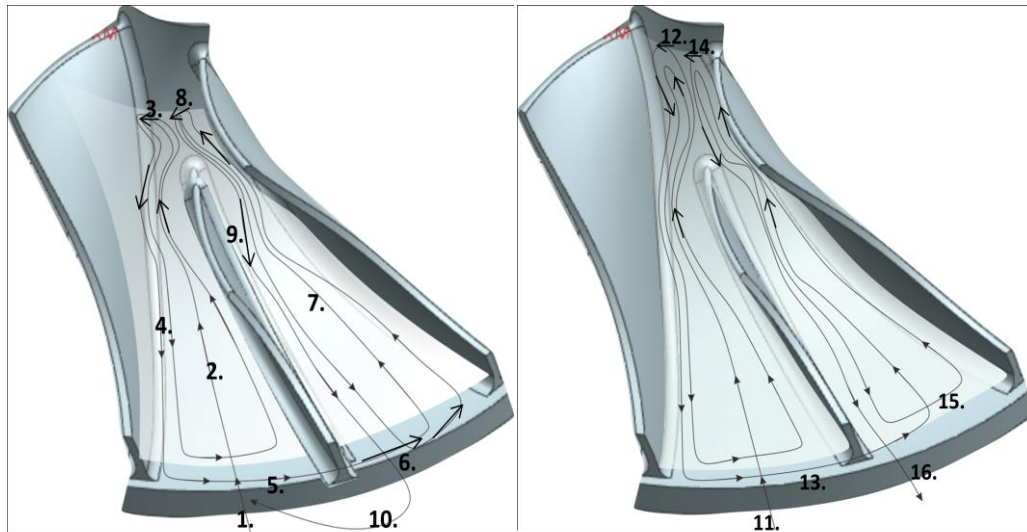
Sama halnya dengan pendefinisian *block*, *cutting tool* yang digunakan pada *software* Powermill ini beragam tidak seperti pada *software* NX. Pada *software* NX, program simulasi dimulai dari *roughing* pada *impeller* yang telah terbentuk *shroudnya* sedangkan pada *software* Powermill, program simulasi dimulai dari *blank material* yang berbentuk persegi untuk kemudian dibentuk *shroudnya* terlebih dahulu. Oleh karena itu, *cutting tool* yang digunakan berjumlah dua buah. *Cutting tool* yang digunakan terdiri dari *cutting tool* yang berdiameter 10 mm tipe *flat end mill* yang digunakan pada saat *roughing* awal dan pemotongan *impeller* dengan *raw material* dan *cutting tool* yang berdiameter 2 mm tipe *ball end mill* digunakan untuk seluruh proses pemesinan *impeller*. Spesifikasi lebih jelas pada *cutting tool* yang digunakan pada seluruh proses pemesinan *impeller* adalah sebagai berikut.



Gambar 4.11 Pendefinisian cutting tool beserta shank dan holder

4. 1. 3. Pengembangan lintasan pahat proses *roughing*

Pengembangan lintasan pahat pada proses *roughing* yang dilakukan adalah sebagai berikut.



Gambar 4.12 Strategi proses *roughing*, layer awal (kiri) dan layer akhir (kanan).

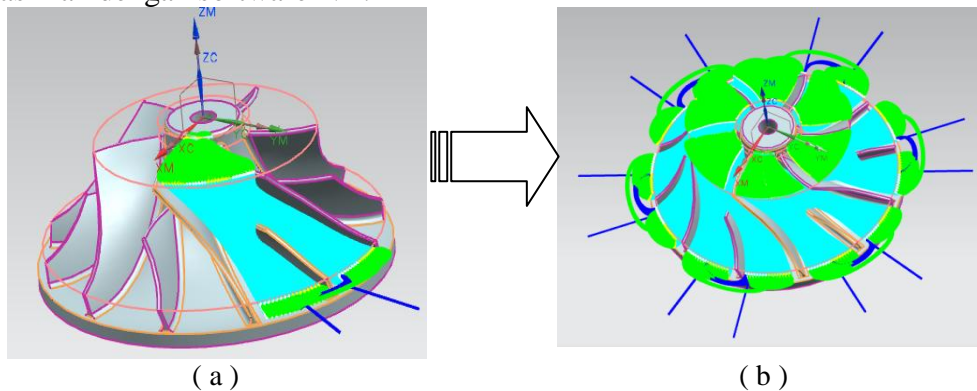
Strategi proses *roughing* yang dilakukan terdiri dari layer (berdasarkan *depth of cut*) dan lintasan (berdasarkan *step over*). Jalur pemakanan pada *impeller* dilakukan berturut-turut dari nomor 1 hingga 10. Setelah nomor 10, jalur pemakanan masuk dari layer awal ke layer akhir dilakukan dengan gerakan yang sama. Nomor 11 menunjukkan arah masuknya *cutting tool* pada layer berikutnya dan nomor 16 merupakan arah keluar dari *cutting tool* setelah proses *roughing* pada satu ruas *blade* selesai. Prinsip dari proses *roughing* ini adalah melakukan pemakanan mulai dari bagian tengah ruas *blade* yang semakin lama menuju pada *blade* sisi kiri dan kanan. Karena *impeller* memiliki *splitter*, pemakanan dilakukan dengan memakan bagian yang berada pada sisi kiri *splitter* terlebih dahulu yang dimulai dari bagian tengah kemudian baru memakan sisi kanan dari *splitter* yang

juga dimulai dari tengah. Berikut adalah parameter pemesinan proses *roughing* impeller diameter 54 mm.

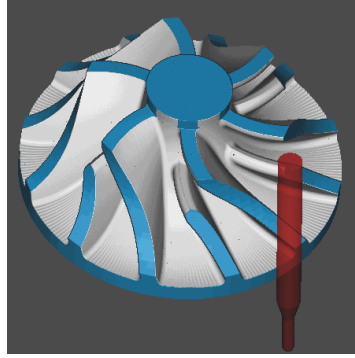
Tabel 4.1 Parameter pemesinan proses *roughing* impeller diameter 54 mm

No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	Diameter <i>cutting tool</i>	2 mm
2	Tipe <i>cutting tool</i>	<i>ball end mill</i>
3	<i>Depth of cut</i>	0.15 mm
4	<i>Step over</i>	0.7 mm
5	<i>Spindle Speed</i>	10000 rpm
6	<i>Feed rate</i>	1300 mm/min
7	<i>Tolerance</i>	0.01 mm
8	<i>Hub stock</i>	1 mm
9	<i>Blade stock</i>	1 mm

Setelah selesai mendefinisikan parameter pemesinan, lintasan pahat dibuat dengan memperhitungkan kemungkinan terjadinya *collision*. Terdapat fitur *gouge check* untuk melihat langsung dimana saja terjadi *collision*. Pergerakan *cutting tool* pada lintasan pahat juga dapat dilihat dengan menggunakan fitur *simulate* atau pun *verify*. Gambar 4.13 memperlihatkan lintasan proses *roughing* dan Gambar 4.14 memperlihatkan hasil verifikasi dan simulasi proses *roughing* yang dihasilkan dengan software NX.



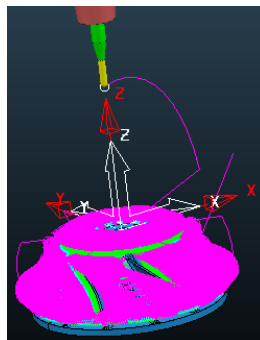
Gambar 4.13 Lintasan pahat *roughing* untuk satu bagian dan untuk semua bagian dari impeller.



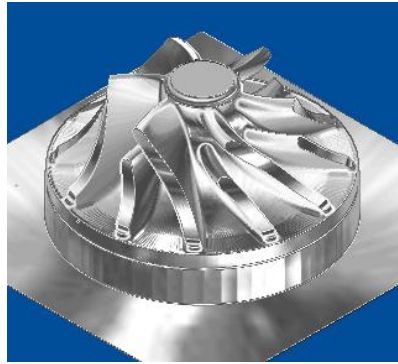
Gambar 4.14 Simulasi proses roughing impeller pada software NX

Pada *software* Powermill, lintasan pahat dibuat dengan menggunakan fitur *lintasan pahat strategies*. Pada dasarnya, pembuatan program pada *software* Powermill tidak jauh berbeda dengan pembuatan program pada *software* NX. Parameter-parameter proses pemesinan yang diatur pada Powermill sama dengan parameter-parameter pada NX. Untuk melakukan proses pemesinan *impeller*, dapat menggunakan program *blisks* yang terdiri dari *blisk areaclear model*, *blade finishing*, dan *hub finishing*. Untuk melakukan proses *roughing*, maka program yang digunakan adalah *blisk areaclear model*. Pergantian *cutting tool* terjadi pada program ini karena sebelumnya menggunakan *cutting tool* yang lebih besar untuk melakukan *roughing* awal dan *finishing shroud* sehingga pergantian *cutting tool* tidak terlewat.

Perhitungan pembuatan lintasan pahat dilakukan setelah *parameter pemesinan* selesai didefinisikan. Sama halnya dengan NX, Powermill juga memperhitungkan kemungkinan terjadinya *collision* dan juga apakah proses pemesinan dengan program lintasan tersebut dapat tercapai atau tidak. Perlu diperhatikan bahwa dalam melakukan pemrograman untuk *blisk* atau *impeller*, perhitungan jumlah *blade* telah sesuai dengan model atau belum. Apabila belum sesuai, terdapat pendefinisian *level* dan *set* yang masih salah sehingga Powermill tidak dapat membaca jumlah *blade* dan *splitter* yang ada. Gambar 4.15 memperlihatkan lintasan proses roughing dan Gambar 4.16 memperlihatkan hasil simulasi proses roughing yang dihasilkan dengan software NX.



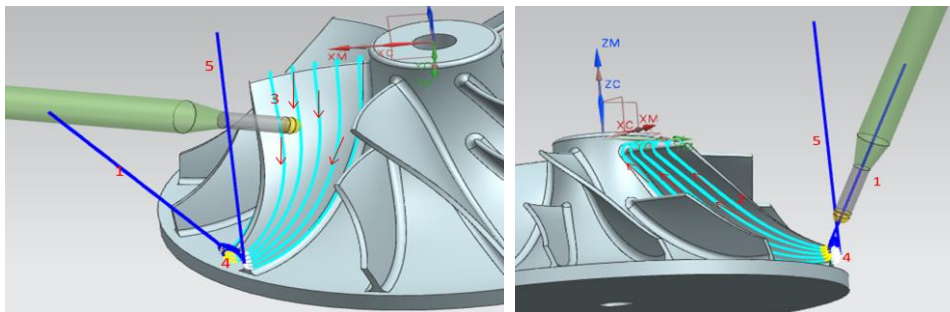
Gambar 4.15. Lintasan pahat pada proses roughing dengan Powermill



Gambar 4.16. Simulasi proses *roughing impeller* pada *software* Powermill

4. 1. 4. Pengembangan Lintasan Pahat untuk Operasi Proses Finishing Pada Blade Dan Splitter

Strategi yang dilakukan pada proses *finishing blade* maupun splitter adalah pemakanan *blade* secara keliling dengan profil penampang *blade* sebagai kedalaman dari model pemakan keliling. Metode ini disebut juga dengan *peripheral milling*. Berikut adalah metode *peripheral milling* yang dilakukan pada proses *finishing blade*.



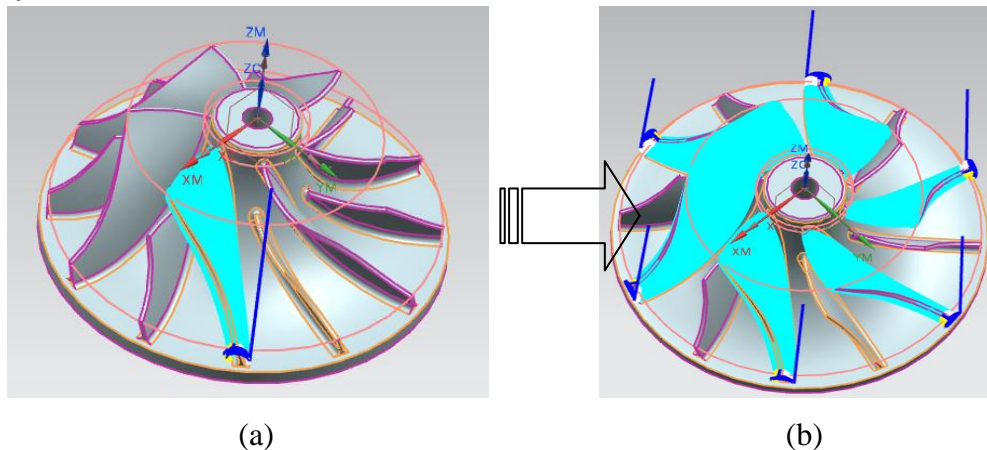
Gambar 4.17 Strategi proses *finishing blade*, tampak depan (kiri) dan tampak belakang (kanan) pada impeller berdiameter 54 mm

Proses *finishing* pada *blade* adalah proses yang memiliki resiko paling tinggi saat proses pemesinan dilakukan karena *blade* yang memiliki kontur permukaan yang paling rumit dan juga ketebalan yang paling tipis. Strategi yang dilakukan adalah dengan menyisakan ketebalan tertentu sebelum proses *finishing* agar saat proses *finishing* dilakukan, bagian *blade* yang seharusnya tidak termakan dapat tetap aman. Selain itu, pemakanan yang dilakukan juga harus merata pada setiap sisi secara terus menerus sampai pada kedalaman pemakanan yang ditentukan. Gerakan pemakanan dilakukan dari nomor 1 sampai dengan nomor 5. Nomor 1 merupakan gerakan *approach* dan *engage*, nomor 5 adalah gerakan *retract* dan *departure*. Nomor 2, 3, dan 4 adalah gerakan yang diulang terus menerus pada setiap layer. Gerakan 2 dan 3 adalah gerakan *cutting* sedangkan gerakan 4 adalah *retract* dan *engage*.

Tabel 4.2 Parameter pemesinan proses finishing blade impeller diameter 54 mm

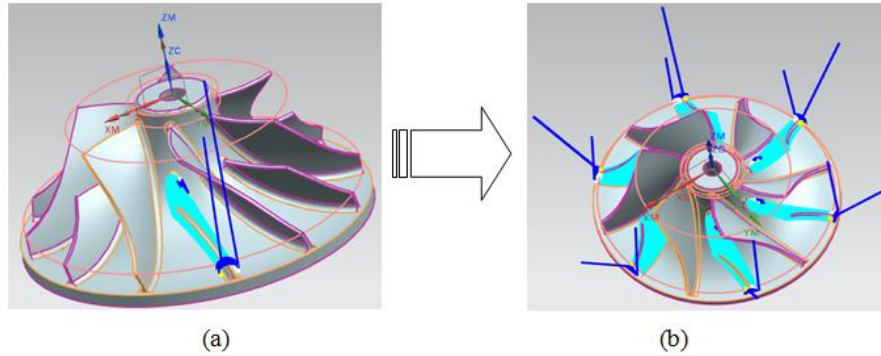
No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	Diameter cutting tool	2 mm
2	Tipe cutting tool	ball end mill
3	Depth of cut	0.08 mm
4	Step over	-
5	Spindle Speed	10000 rpm
6	Feed rate	1300 mm/min
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	1 mm
9	Blade stock	0 mm

Gambar 4.18 menggambarkan lintasan pahat untuk *finishing blade* dengan *software NX*.

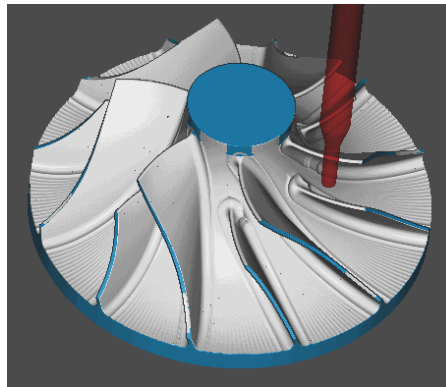


Gambar 4.18 Program *finishing blade* untuk satu bagian (a) dan untuk semua bagian (b) pada *impeller* berdiameter 54 mm.

Setelah melakukan pemrograman untuk *blade*, selanjutnya adalah pemrograman lintasan pahat pada *splitter*. Fitur-fitur dan parameter pemesinan yang digunakan sama dengan proses *finishing* pada *blade*, hanya saja pada fitur *drive method*, geometri yang akan dilakukan proses pemesinan adalah *splitter*. Gambar 4.19 memperlihatkan gambar lintasan pahat untuk operasi finishing *splitter*, sedangkan Gambar 4.20 memperlihatkan hasil simulasi dari *software NX*.



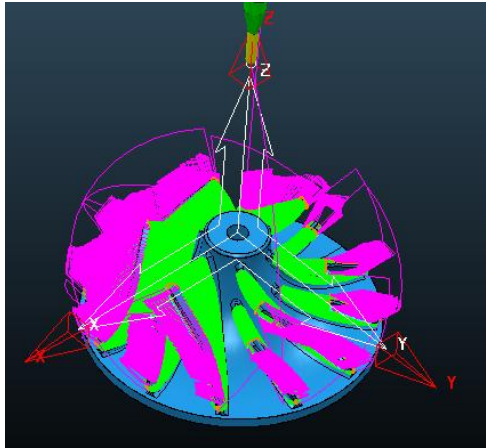
Gambar 4.19. Gambar *finishing splitter* untuk satu *splitter* (a) dan untuk semua *splitter*(b)



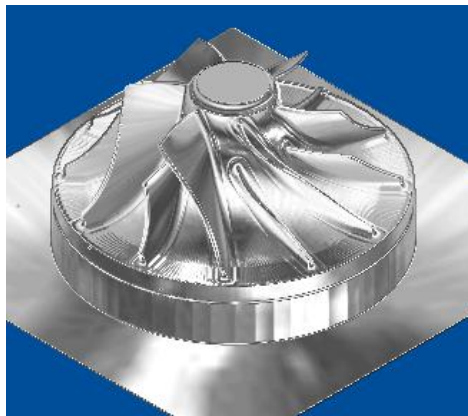
Gambar 4.20. Simulasi proses *finishing blade impeller* pada *software NX*

Strategi pada proses *finishing blade* yang dilakukan pada *software NX* juga diterapkan pada Powermill agar dapat dilakukan pemakanan yang sesuai dan aman bagi *blade*. Saat menyisakan ketebalan pada *blade*, hal yang perlu diperhatikan adalah jarak antar *blade* yang semakin tipis dikarenakan *blade* hasil proses *roughing* yang masih tebal. Hal ini akan mempengaruhi program *roughing* yang sebelumnya telah dibuat. Apabila disisakan ketebalan *blade* yang terlalu berlebih maka program *roughing* akan berhenti sebelum sampai pada hasil yang diinginkan. Sebaliknya, apabila ketebalan *blade* hanya disisakan sedikit maka resiko *blade* patah atau terjadinya *collision* akan semakin besar.

Pada proses *finishing blade* yang dilakukan, arah perubahan *tool axis* harus dibatasi mulai dari 0° sampai dengan 90° . Hal ini dilakukan sebagai upaya penyesuaian dengan mesin untuk melakukan proses pemesinan yang sebenarnya. Pada mesin tersebut, gerakan pada sumbu B dibatasi hanya sampai dengan 90° sehingga apabila program dibuat dengan *tool axis* melebihi batas tersebut, maka saat melakukan proses pemesinan mesin akan berhenti karena tidak mampu mencapai sudut melebihi batas tersebut.



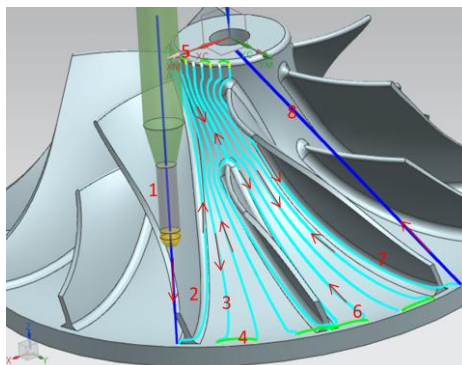
Gambar 4.21. Lintasan pahat pada proses finishing blade dan splitter dengan Software Powermill



Gambar 4.22. Simulasi proses *finishing blade impeller* diameter 54 mm pada software Powermill

4. 1. 5. Membuat Operasi Proses Finishing Pada Hub

Meskipun dilakukan berulang kali sampai pada ke dalaman permukaan hub, proses *finishing* hub selalu menggunakan strategi yang sama. Berikut adalah gambar strategi pemesinan yang dilakukan pada proses *finishing* hub.



Gambar 4.23 Strategi proses *finishing hub* pada *impeller* berdiameter 54 mm

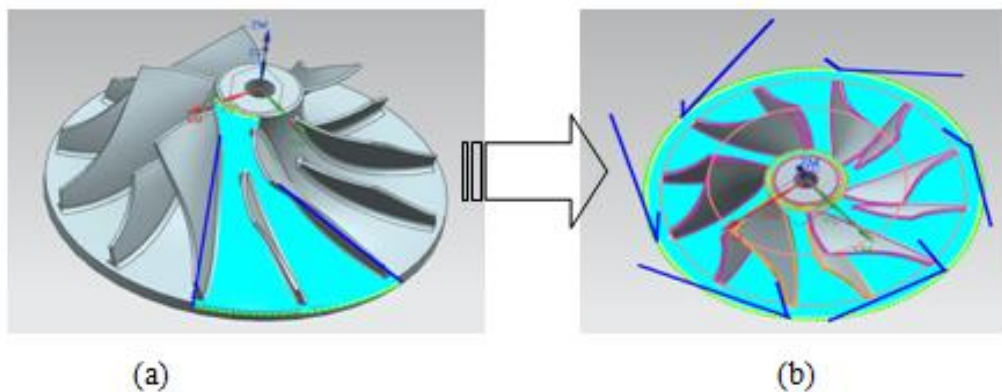
Strategi yang dilakukan adalah melakukan proses pemakanan dari *blade* yang berada di sebelah kiri menuju ke splitter lalu ke *blade* yang berada di sebelah kanan. Gerakan makan ditunjukkan dari nomor 1 sampai dengan nomor 8.

Proses *finishing* pada *hub* mirip dengan proses *roughing*. Perbedaan terletak pada parameter pemesinan dari *hub finishing* yang tidak memiliki *depth of cut*. Parameter pemesinan yang terdapat pada proses *hub finishing* adalah sebagai berikut.

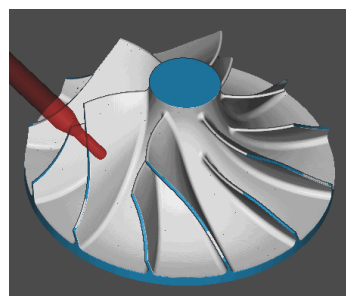
Tabel 4.3 Parameter pemesinan proses finishing hub impeller diameter 54 mm

No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	Diameter cutting tool	2 mm
2	Tipe cutting tool	ball end mill
3	Increment	0.225 mm
4	Step over	0.5 mm dan 0.2 mm
5	Spindle Speed	10000 rpm
6	Feed rate	1300 mm/min
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	0 mm
9	Blade stock	0 mm

Lintasan pahat yang dihasilkan dengan software NX dapat dilihat pada Gambar 4.24, sedangkan simulasinya dapat dilihat pada Gambar 4.25.

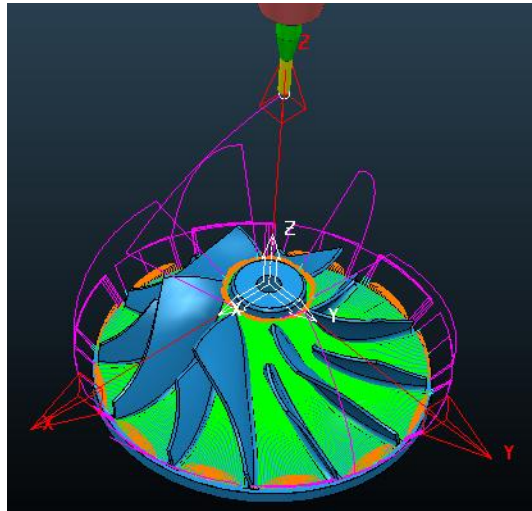


Gambar 4.24 Proses finishing hub untuk satu bagian (a) dan semua bagian (b)



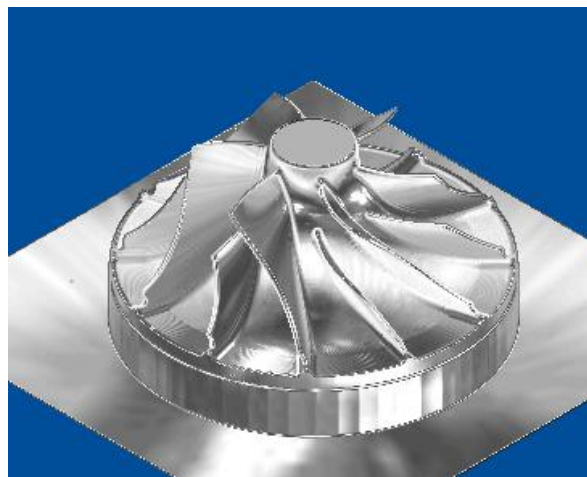
Gambar 4.25 Simulasi proses finishing hub impeller pada software NX

Proses *hub finishing* yang telah selesai menandakan bahwa *impeller* telah selesai dibuat. Akan tetapi, perlu dilakukan program pemotongan agar *impeller* tersebut terpisah dari *raw material*-nya. Pergantian *cutting tool* terjadi pada proses ini yaitu dengan menggunakan *cutting tool flat end mill* berdiameter 10 mm. Strategi pemesinan yang dilakukan adalah memotong *raw material* yang berada tepat di bagian bawah *impeller* dengan menyisakan persegi sebesar 20 mm x 20 mm x 10 mm. Hal tersebut dilakukan untuk proses selanjutnya, *raw material* yang disisakan tersebut dipotong secara manual dengan gergaji tangan.



Gambar 4.26. Lintasan pahat pada proses *finishing hub*.

Gambar 4.27 berikut ini adalah hasil simulasi pada *software* Powermill.



Gambar 4.27 Simulasi proses *finishing hub impeller* dengan *software* Powermill

4. 1. 6. Proses Pemesinan Mili-impeller

Proses pemesinan dilakukan pada mesin milling 5-axis DMU DMG 50 Evo Linear seperti terlihat pada Gambar 5.28. Mesin ini merupakan *macro-scale machine tools* yang pada riset ini digunakan untuk operasi ukuran milli. Langkah kerja maksimum dari mesin ini berdimensi 500 mm x 450 mm x 400 mm. Sumbu X, Y dan Z berada pada *head*, tempat tool

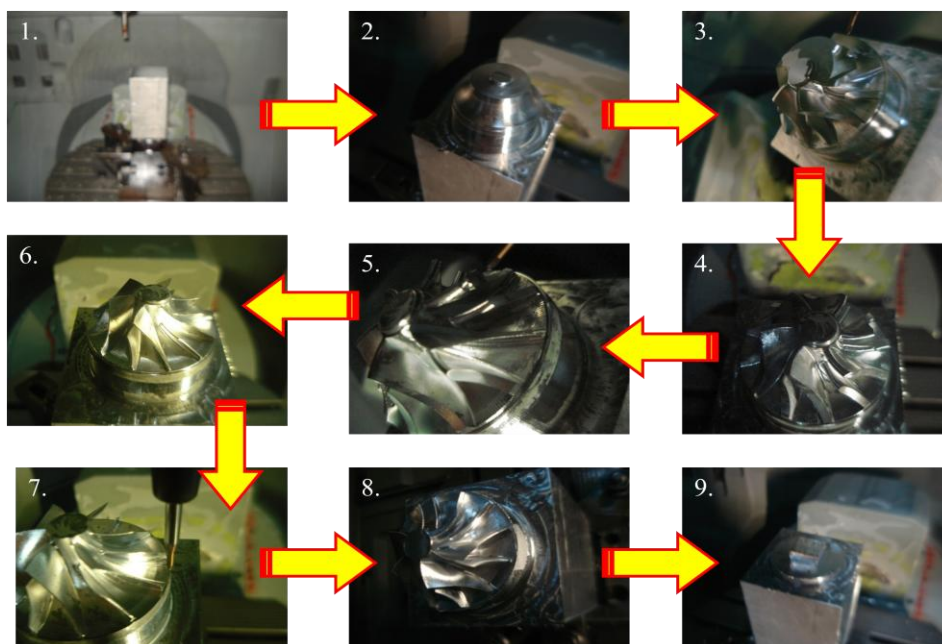
diletakkan. Sedangkan, sumbu B dan C berada pada bed yang memiliki maksimum rotasi berturut-turut sebesar 90° dan 360°.



Gambar 4.28. DMU DMG 50 Evolution Linear Machine Tool [5]

Alur dari proses manufaktur mili-impeller adalah seperti tergambar pada Gambar 5.29. Penomoran dari menunjukkan urutan dari proses yang dilakukan, yaitu :

1. Penempatan benda kerja
2. Proses pembuatan *shroud*
3. Proses pemesinan *roughing*
4. Proses pemesinan *after-roughing*
5. Proses pemesinan *Blade finishing*
6. Proses pemesinan *After-blade finishing*
7. Proses pemesinan *After-hub finishing*
8. Proses pemesinan *Raw material pre-cutting*
9. Bahan baku yang tertinggal setelah gerakan pemotongan.



Gambar 4.29 Alur proses pemesinan impeller dengan diameter 54 mm diameter

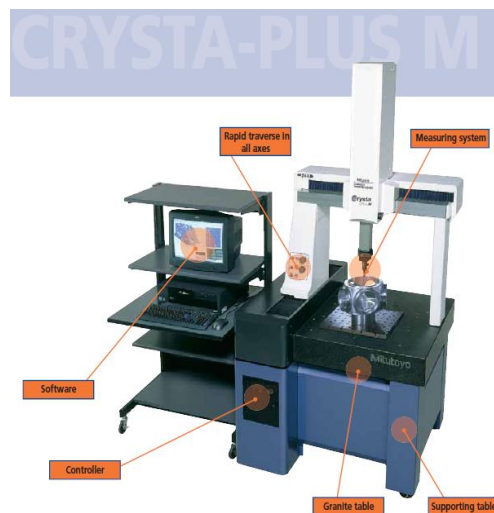
Hasil pemesinan dapat dilihat pada Gambar 4.30 berikut ini.



Gambar 4.30 Hasil proses pemesinan impeller dengan diameter 54 mm

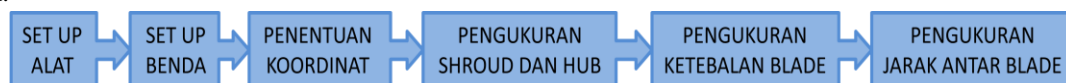
4. 1. 7. Pengecekan kualitas impeller hasil pemesinan

Coordinate Measuring Machine (CMM) Mitutoyo M443 dengan dimensi ruang kerja 400 mm x 400 mm x 300 mm digunakan untuk mengecek kualitas hasil pemesinan. Tingkat kepresisian dari CMM adalah 0.5 μm . *Touch probe* adalah alat yang digunakan sebagai sensor pada mesin CMM. *Touch probe* memiliki karakteristik yang mirip dengan *cutting tool* namun memiliki fungsi yang berbeda yaitu untuk mengukur koordinat dari benda uji. *Touch probe* memiliki ukuran yang beragam namun yang digunakan pada penelitian ini adalah *touch probe* yang memiliki diameter 1 mm. *Touch probe* tersebut dipilih agar dapat menjangkau seluruh geometri yang ada pada benda uji yang berukuran mini.



Gambar 4.31. CMM Mitutoyo Crysta-Plus M443 [7]

Gambar 4.32 berikut ini adalah alur proses dari pengecekan kualitas hasil pemesinan dengan menggunakan CMM.



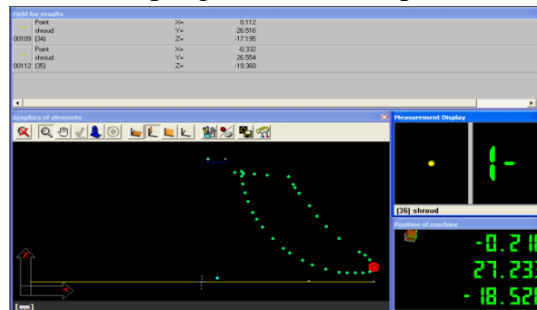
Gambar 4.32 Alur pengecekan kualitas impeller hasil pemesinan

Set up eksperimen dilakukan dengan menyalakan kompresor, menghidupkan semua tombol yang terkait dengan pengaturan mesin. Agar ketinggian dari workpiece dapat

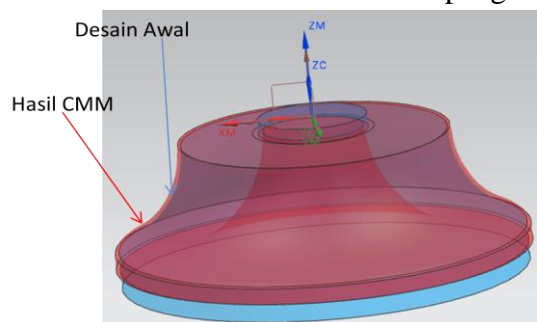
mencapai touch probe, terkadang diperlukan obyek lain sehingga ketinggiannya tercapai. Selain itu diperlukan plastisin atau lilin untuk menempelkan workpiece ke meja dari CMM. Pengukuran dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan titik X0, Y0 dan Z0 sebagai koordinat 0,0,0 sebagai acuan untuk titik-titik hasil pengukuran selanjutnya. Untuk pengukuran impeller ini, titik-titik yang dibutuhkan adalah titik-titik pada *shroud* dan *hub* dari masing-masing *blade*; ketebalan *blade* diukur dengan mengambil titik-titik pada tiap sisi dari *blade*; dan begitu pula jarak antara masing-masing *blade* dan *splitter* juga diukur. Dengan bantuan sistem CAD, titik-titik yang terkumpul di transformasikan menjadi titik-titik yang lebih terstruktur layaknya model 3D dari *hub* dan *shroud*. Model *hub* dan *shroud* yang terbentuk dibandingkan dan dicocokkan dengan desain original untuk melihat adanya *error*.



Gambar 4.33 Titik-titik pengukuran dari impeller berdiameter 54 mm



Gambar 4.34 Titik-titik koordinat hasil pengukuran



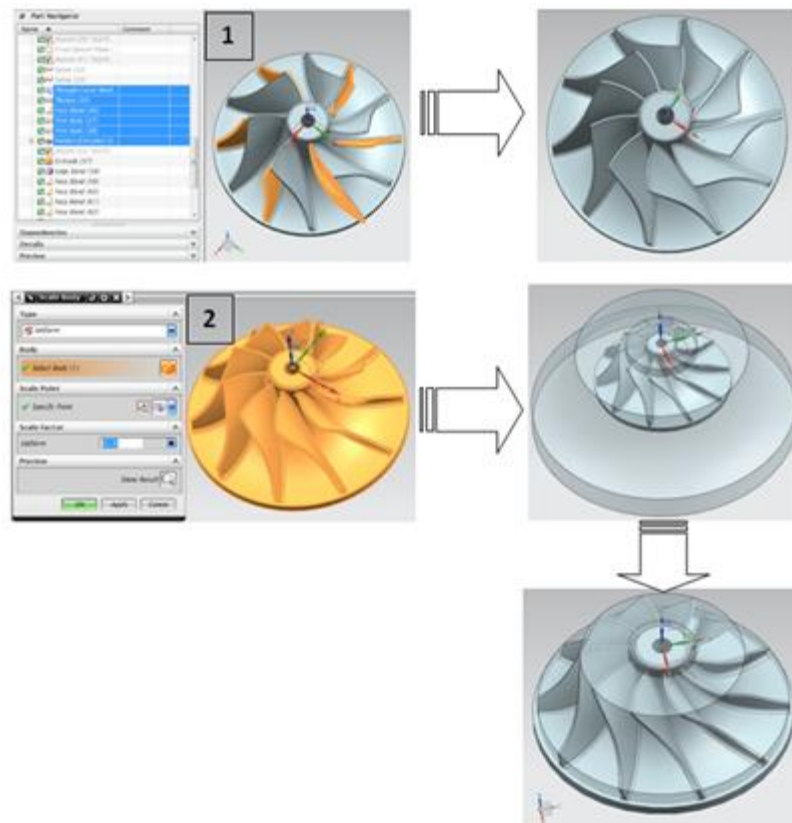
Gambar 4.35 Komparasi antara model hasil pengukuran CMM dengan desain awal

5. 2. Pengembangan mini-impeller berdiameter 27 mm dari pen-skalaan 1 : 2 mini-impeller berdiameter 54 mm

Faktor skala 1 : 2 digunakan untuk mendapatkan desain impeller dengan dimensi yang lebih kecil dari desain mini-impeller sebelumnya. Namun, keberadaan *splitter* pada desain sebelumnya ditiadakan, mengingat faktor kompleksitas dan kesulitan yang akan dihadapi pada saat proses pemesinan. Begitu pula dengan jumlah *blade* yang semula berjumlah 10,

dikurangi hingga berjumlah hanya 8 blade dengan ketebalan blade sebesar 0.3 mm. Ketebalan blade lebih tipis bila dibandingkan dengan desain sebelumnya yaitu 0.6 mm.

Alur pen-skalaan dilakukan pada software NX dengan urutan seperti yang terlihat pada Gambar 4.31.



Gambar 4.36 Alur urutan pen-skalaan pada *software* NX

Pada langkah ke-1, model splitter dihapus dan jumlah *array* blade dikurangi dari 10 blade menjadi 6. Selanjutnya pada langkah ke-2 dilakukan scaling dengan faktor skala 1:2.

4.2.1. Pengembangan Lintasan pahat untuk proses *Roughing* mili-impeller berdiameter 27 mm

Selanjutnya, dilakukan pengembangan lintasan pahat untuk hasil desain dari pen-skalaan impeller berdiameter 64 mm menjadi 27 mm. Tahapan dan proses pengembangan lintasan pahat mili-impeller sama dengan tahapan dan proses yang dilakukan pada impeller berdiameter 54 mm.

Pertama-tama adalah menentukan proses *roughing*, dengan parameter pemesinan seperti terlihat pada tabel berikut ini.

Table 4.4 Parameter pemesinan untuk proses roughing impeller berdiameter 27 mm

No	Machining Parameter	Diameter 27 mm
1	Diameter cutting tool	1 mm
2	Type cutting tool	ball end mill
3	Depth of cut	0.1 mm
4	Step over	0.3 mm
5	Spindle Speed	9000 rpm
6	Feed rate	800 mm/min
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	1.2 mm
9	Blade stock	0.5 mm

Berdasarkan parameter pemesinan, proses roughing dilakukan dengan strategi pemesinan seperti terlihat pada Gambar 4.37.



Gambar 4.37 Layer pertama pada proses roughing untuk impeller berdiameter 27 mm

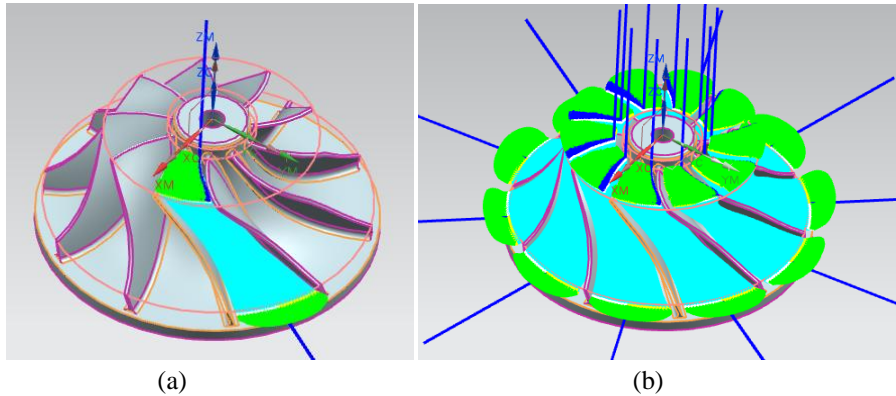
Strategi pemotongan serupa dengan impeller yang berdiameter 54 mm sebelumnya, namun disini gerak tool hanya dilakukan untuk satu area dari blade. Arah pemotongan bermula dari nomor 1 hingga nomor 5, selebihnya dari nomor 5 adalah proses pemotongan pada layer selanjutnya.



Gambar 4.38 Layer kedua dari strategi proses roughing impeller berdiameter 27 mm .

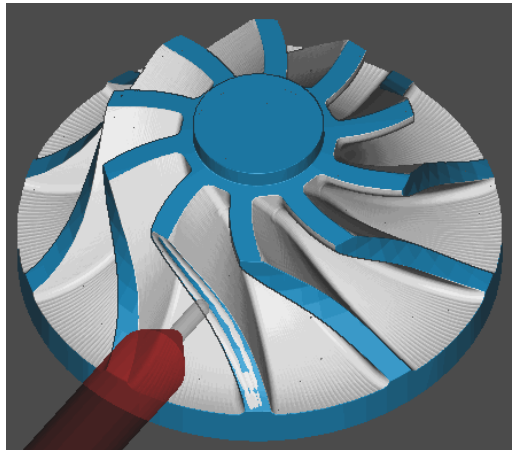
Nomor 6 menunjukkan arah masuk pertama dan berlanjut hingga nomor 10. Blade stock yang diijinkan adalah 0.5 mm dan hub stock yang diijinkan adalah 1.2 mm.

Strategi pemesinan dan lintasan pahat yang dihasilkan oleh software NX adalah seperti terlihat pada Gambar 4.39.



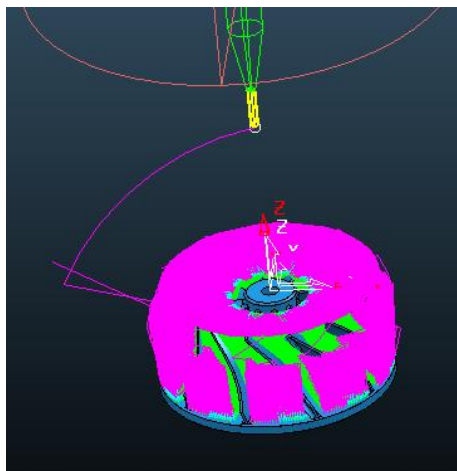
Gambar 4.39 Lintasan pahat proses roughing impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (jarak antara blade) (a) dan untuk seluruh bagian (b)

Hasil lintasan pahat diverifikasi dan disimulasikan dengan software NX seperti terlihat pada Gambar4.40 berikut ini.

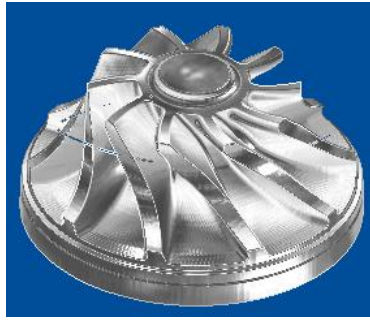


Gambar4.40 Simulasi proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software NX

Gambar 4.41 dan 4.42 memperlihatkan hasil pengembangan lintasan pahat dan simulasi menggunakan software Powermill.



Gambar 4.41 Lintasan pahat proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software Powermill



Gambar 4.42 Simulasi proses roughing impeller berdiameter 27 mm dengan software Powermill

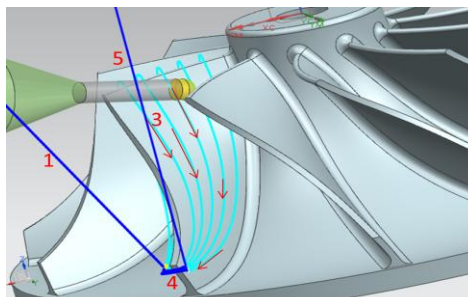
4.2.2. Pengembangan lintasan pahat Blade Finish

Operasi ini sangatlah beresiko karena ketebalan blade 0.3 mm dapat saja menemui kegagalan. Metode peripheral milling digunakan seperti halnya metode yang digunakan pada proses blade finishing pada impeller berdiameter 54 mm. Stock blade yang diijinkan adalah 0.5 mm. Parameter pemesinan untuk proses blade finish adalah seperti terlihat pada Tabel 4.5.

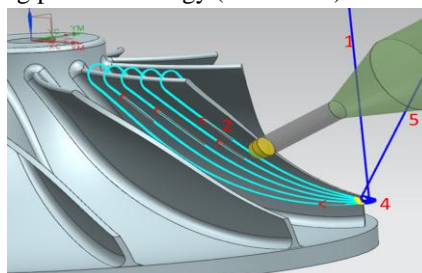
Table 4.5 Parameter pemesinan untuk proses finishing

No	Machining Parameter	Diameter 27 mm
1	Diameter cutting tool	1 mm
2	Type cutting tool	ball end mill
3	Depth of cut	0.05 mm
4	Step over	-
5	Spindle Speed	9000 rpm
6	Feed rate	800 mm/min
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	1.2 mm
9	Blade stock	0 mm

Berdasarkan parameter pemesinan, maka strategi blade finishing adalah seperti terlihat pada Gambar 4.43 berikut.



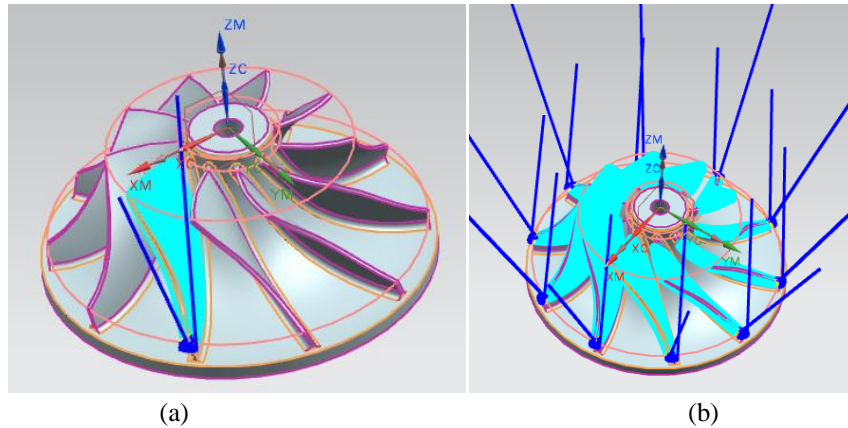
Gambar 4.43 finishing process strategy (front view) of 27mm diameter impeller



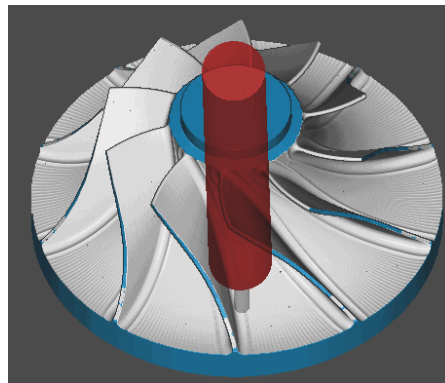
Gambar 4.44 Blade finishing process strategy (rear view) of 27mm diameter impeller

Gerakan peripheral milling dapat terlihat dari pola gerak sirkula dari tool yang mengelilingi area blade. Urutan gerak diperlihatkan dari nomor 1 1 (approach + engage), nomor 2 dan 3 (cutting), nomor 4 (retract + engage), dan nomor 5 (departure). Proses nomor 1 dan 5 hanya terjadi sekali pada setiap proses (permulaan dan akhir). Selebihnya, nomor 2,3 dan 4 terjadi berulang-ulang sampai tool menyentuh dasar atau lantai dari blade (hub).

Verifikasi adan simulasi proses blade finishing menggunakan software adalah seperti terlihat pada Gambar 4.45 dan 4.46 berikut ini.

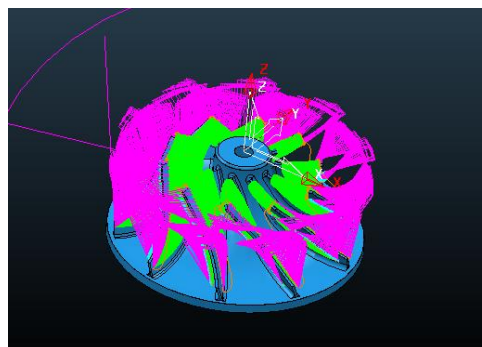


Gambar 4.45 Lintasan pahat proses Blade finishing untuk impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (daerah antara blade) (a) dan untuk semua bagian



Gambar 4.46 Simulasi proses Blade finishing untuk blade berdiameter 27 mm menggunakan software NX

Sedangkan hasil lintasan pahat dan simulasi untuk proses finishing menggunakan software Powermill seperti terlihat pada Gambar 4.47 dan Gambar 4.48 berikut ini.



Gambar 4.47 Lintasan pahat proses blade finishing impeller berdiameter 27 mm



Gambar 4.48 Simulasi proses Blade finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan software Powermill

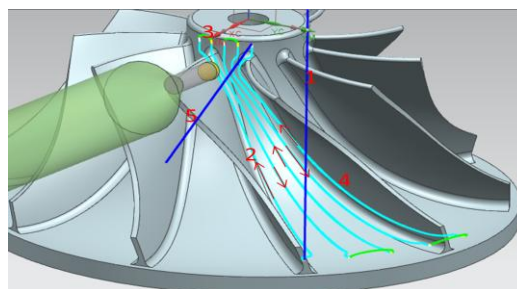
4.2.3. Pengembangan lintasan pahat Hub finishing

Proses hub finishing adalah proses untuk menghilangkan material dari bagian hub. Pada proses hub roughing yang dilakukan sebelumnya, meninggalkan material setebal 1.2 mm dengan stock hub yang diijinkan dan mengakibatkan beberapa area tidak terselesaikan dan diperlukan operasi pemotongan lebih lanjut. Proses hub finishing dimaksudkan untuk membuang material yang tersisa dan dilakukan secara bertingkat sesuai dengan depth of cut. Parameter pemesinan untuk proses hub finishing seperti terlihat pada Tabel 4.6 berikut ini.

Table 4.6 Parameter pemesinan untuk proses *Hub finishing*

No	Machining Parameter	Diameter 27 mm
1	Diameter cutting tool	1 mm
2	Type cutting tool	ball end mill
3	Increment	0.1 mm
4	Step over	0.3 mm dan 0.1 mm
5	Spindle Speed	12000 rpm
6	Feed rate	600 mm/min
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	0 mm
9	Blade stock	0 mm

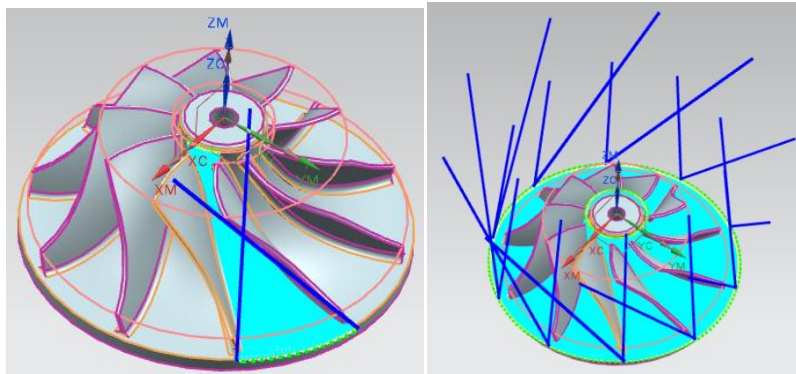
Berdasarkan parameter pemesinan, strategi proses hub finishing seperti terlihat pada Gambar 4.49 berikut ini.



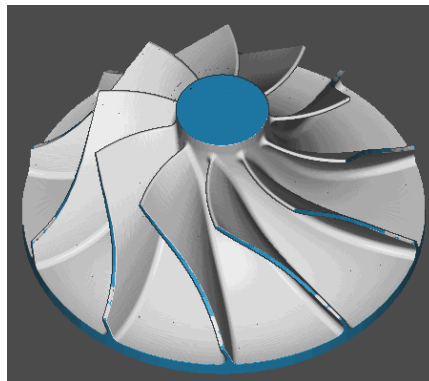
Gambar 4.49 Strategi proses Hub finishing untuk impeller berdiameter 27 mm

Urutan gerakan proses hub finishing dimulai dari nomor 1 (approach + engage) sampai nomor 5 (retract + departure). Nomor 2 and 4 adalah proses pemotongan yang bergerak dari trailing edge ke leading edge, dari sebelah kiri ke sebelah kanan (dari permukaan suction ke permukaan pressure). Nomor 3 adalah gerak engage dan retract.

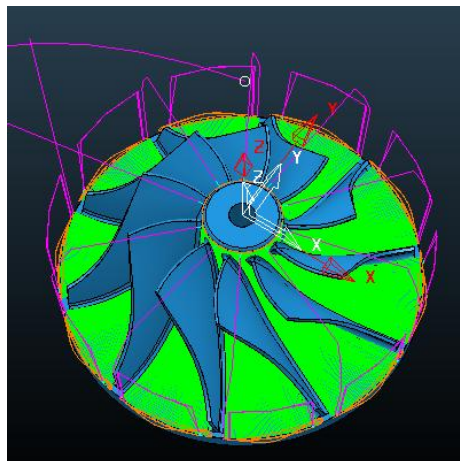
Hasil pengembangan lintasan pahat dan simulasi dengan menggunakan software NX dapat dilihat pada Gambar 4.50 dan 4.51 berikut ini.



Gambar 4.50 Lintasan pahat Hub finishing impeller berdiameter 27 mm untuk satu bagian (a) dan untuk semua bagian (b) menggunakan software NX



Gambar 4.51 Simulasi Hub finishing process impeller berdiameter 27 mm dengan software NX
Sedangkan hasil dari pengembangan lintasan pahat dan simulasi menggunakan software Powermill dapat dilihat pada Gambar 4.52 dan Gambar 4.53 berikut ini.



Gambar 4.52 Lintasan pahat proses Hub finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan Powermill



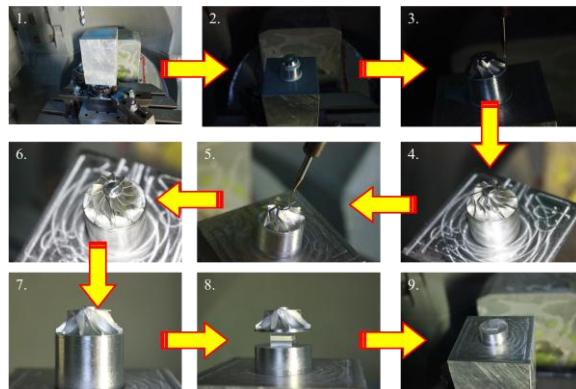
Gambar 4.53 Verikisai dan simulasi proses Hub finishing impeller berdiameter 27 mm menggunakan Powermill

4.2.4. Proses pemesinan impeller berdiameter 27 mm

Mesin milling 5-axis DMU DMG 50 evo linear digunakan untuk melakukan proses pemesinan seperti halnya dengan pemesinan impeller berdiameter 54 mm sebelumnya.

Alur proses pemesinan seperti terlihat pada Gambar 4.54. Penomoran dari menunjukkan urutan dari proses yang dilakukan, yaitu :

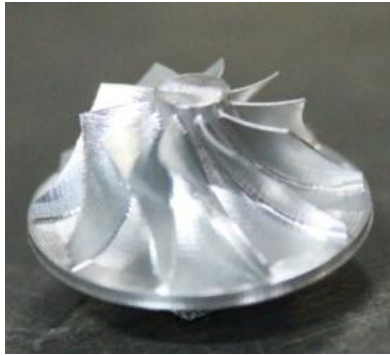
1. Penempatan benda kerja
2. Proses pembuatan shroud
3. Proses pemesinan roughing
4. Proses pemesinan after-roughing



Gambar 4.54 Alur proses pemesinan impeler dengan diameter 27 mm

5. Proses pemesinan Blade finishing
6. Proses pemesinan After-blade finishing
7. Proses pemesinan After-hub finishing machining process
8. Proses pemesinan Raw material pre-cutting
9. Bahan baku yang tertinggal setelah gerakan pemotongan

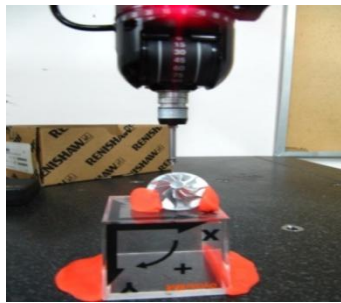
Hasil dari pemesinan impeller berdiameter 27 mm seperti terlihat pada Gambar 2.55 berikut.



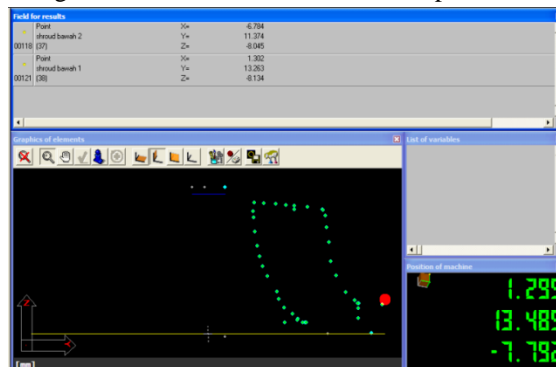
Gambar 4.55 *The machined 27 mm diameter impeller*

4.2.5. Pengecekan/pengukuran kualitas mini-impeller hasil pemesinan

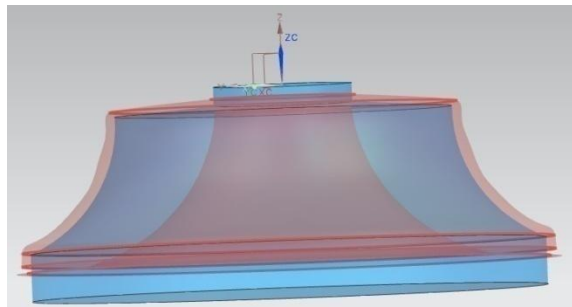
Metode dan alat ukur (CMM Mitutoyo M443) yang sama digunakan untuk mengukur impeller berdiameter 27 mm. Proses pengukuran, hasil titik-titik koordinat pengukuran dan komparasi antara model hasil pengukuran dan desain awal terlihat berturut-turut pada Gambar 2.56, Gambar 2.57 dan Gambar 2.58.



Gambar 4.56 Pengukuran titik-titik koordinat dari impeller berdiameter 27 mm



Gambar 4.57 Titik-titik koordinat hasil pengukuran



Gambar 4.58 Komparasi antara model hasil CMM dan desain awal

5.3. Analisa Pemesinan Mini-impeller

Analisa pada mini-impeller meliputi analisa parameter pemesinan, analisa waktu pemesinan, analisa lintasan pahat dan analisa kualitas hasil pemesinan.

4.3.1. Analisa parameter pemesinan mini-impeller.

Parameter pemesinan yang dianalisis adalah parameter independent yang menentukan hasil proses pemesinan. Yang termasuk parameter pemesinan independent adalah diameter cutting tool (D_c), spindle speed (n), number of teeth (z_c), feed rate (v_f), step over (a_e), dan depth of cut (a_p). Telah dijelaskan pada bab sebelumnya, persamaan yang digunakan untuk menentukan parameter pemesinan lainnya (dependent) adalah persamaan (1), (2), dan (3). Parameter dianalisis pada setiap lintasan pahat yang dibuat.

Ketika proses downscaling berlangsung, ada sedikit penurunan laju pembuangan geram: pada proses blade finishing (walaupun dengan nilai stepover besar) memiliki nilai yang lebih kecil dari laju pembuangan geram pada proses roughing. Menurut fakta-fakta tersebut, parameter pemesinan untuk proses blade finishing bisa diadaptasi dari proses roughing. Jika tidak ada masalah (seperti rusaknya material atau rusaknya tool) pada proses roughing dengan MRR tertentu, sehingga dengan nilai maks MRR dari proses roughing, proses blade finishing diperbolehkan untuk menggunakan stepover dan kedalaman potong tertentu. Tapi, hal yang paling harus diperhatikan adalah ketebalan blade yang sangat tipis akan mempengaruhi perhitungan gaya pemotongan, sehingga penelitian lebih lanjut tentang gaya pemotongan diperlukan.

Proses hub finishing memiliki MRR terkecil di antara yang lain karena permukaan halus (daerah pemotongan), dan pengaturan stepover akan menurunkan ketinggian scallop yang terbentuk sehingga profil permukaan hub akan memiliki kualitas yang lebih baik.

4.3.2. Analisa waktu pemesinan

Waktu pemesinan sebenarnya jauh lebih lama dibandingkan dengan waktu hasil estimasi dari software, baik untuk impeller berdiameter 54 mm dan 27 mm. Alasan yang paling memungkinkan adalah bahwa tingkat kemampuan makan menurun dalam proses pemesinan yang sebenarnya.

Menurut perhitungan dari rumus (4), estimasi waktu pemesinan dari software ini telah diverifikasi dan dianggap akurat, tetapi gaya-gaya dinamis yang terjadi dalam proses pemesinan aktual tidak dapat dihitung pada perangkat lunak dan menyebabkan waktu mesin yang berbeda. Umur pahat juga akan mempengaruhi waktu mesin dalam hal penurunan kinerja selama keausan dan umur pakai pahat.

4.3.3. Analisa lintasan pahat mini-impeller

Lintasan pahat yang dianalisis terdiri dari lintasan pahat proses roughing, lintasan pahat proses blade finishing, dan lintasan pahat proses hub finishing untuk kedua impeller dengan diameter 54 mm dan impeller berdiameter 27 mm.

Berdasarkan pengembangan alat dilakukan jalur, jalur alat seadanya untuk kedua impeller adalah sama meskipun berbagai jenis impeller dilakukan. Meskipun pada impeller

berdiameter 54 mm memiliki splitter, sedangkan impeller berdiameter 27 mm tidak memiliki splitter, namun operasi roughing untuk kedua impeler menunjukkan pola yang sama. Pada impeller diameter 54 mm, proses roughing dilakukan dengan pola lingkaran dekat yang memasuki areal pemotongan dari bagian tengah di sisi kiri antara splitter dan blade, dan kemudian pindah ke sisi kanan dengan pola yang sama. Dalam lintasan pahat yang dihasilkan untuk impeller berdiameter 27 mm, pola serupa dilakukan sebagai pola roughing dari impeller sebelumnya. Kemungkinan interferensi antara alat potong dan benda kerja pada operasi roughing itu sangat kecil.

Pada proses finishing blade, tidak ada perbedaan antara dua impeler. Proses pemotongan keduanya dilakukan oleh peripheral milling yang mengitari blade dan bidang blade ditetapkan sebagai kedalaman potong. Gerakan pemotongan melingkar dilakukan agar deformasi blade tidak terjadi, dengan metode ini, bagian dalam blade (dekat hub) berfungsi sebagai pendukung untuk blade yang sebelumnya diproses.

Hub finishing untuk kedua impeler menunjukkan sedikit perbedaan meskipun masih sama. Seperti proses roughing, impeler pertama dipotong dari sisi kiri splitter pada awalnya dan terus ke sisi kanan, sebaliknya, pada impeller yang lebih kecil, gerakan pemotongan hanya dilakukan pada satu sisi kiri atau sisi kanan. Selanjutnya, stock yang diijinkan pada daerah sempit pada blade adalah 1 mm untuk impeller pertama, sedangkan 1,2 mm untuk impeller yang lebih kecil. Area sempit blade untuk impeller pertama adalah di sisi kanan antara splitter dan blade, dan untuk impeller yang lebih kecil berada di bagian atas blade.

4.3.4. Analisa kualitas hasil pemesinan mini-impeller

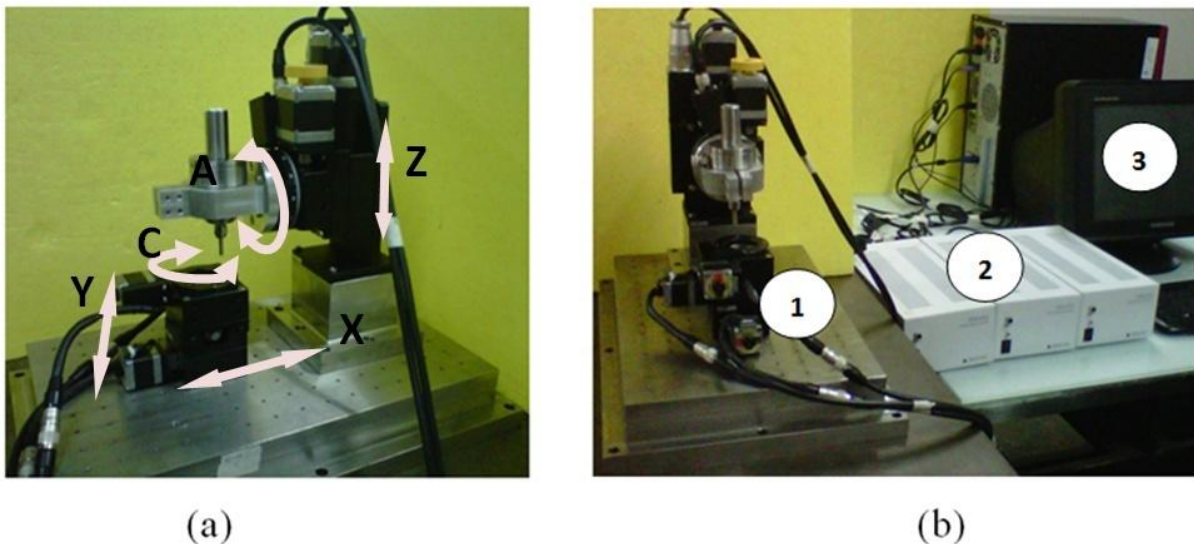
Berdasarkan hasil pengukuran dengan menggunakan CMM (coordinate Measuring Machine), terdapat sedikit perbedaan yang ditemukan pada hasil pemesinan dan hasil desain. Namun demikian, alasan dari fenomena ini tidak dapat dikatakan sebagai akibat dari proses pemesinan yang tidak sesuai. Perbedaan koordinat pada tiap titik yang disebabkan oleh metode kalibrasi pada CMM merupakan kemungkinan terbesar menjadi alasan ketidaksesuaian ini. Touch probe memiliki diameter 1 mm, ini dapat disimpulkan bahwa pengukuran tidak akurat seperti yang disebutkan sebelumnya yaitu ketelitian hingga 0.5 μm .

5. 4. Micro-impeller berdiameter 2 mm

Pada pembuatan mini-impeller berdiameter 54 mm dan 27 mm, mesin milling 5-axis yang digunakan adalah mesin milling macro-scale yang tersedia di pasaran secara komersial. Namun, mesin milling 5-axis tersebut tidak memungkinkan untuk menghasilkan produk berukuran mikro, karena keterbatasan pemegang tool dan pencekam benda kerja. Sehingga, proses pemesinan micro-impeller harus dilakukan pada mesin micro-milling 5-axis yang telah dikembangkan melalui Hibah Kolaborasi Internasional 2010 – 2012 bersama YeungNam University, seperti terlihat pada Gambar 4.59.

Mesin micro-milling ini memiliki 3 sumbu gerak translasi XYZ dan dua sumbu putar AC, dimana sumbu A berputar terhadap sumbu X dan sumbu C berputaran terhadap sumbu Z. Masing-masing sumbu digerakkan oleh motor stepper dengan spesifikasi seperti terlihat pada Tabel 2.8. Putaran dan gerak dari motor stepper di kontrol dengan DS102 yang dihubungkan ke sebuah PC menggunakan perangkat lunak DSControl-Win. Proses

pemesinan dan uji eksperimental dari pembuatan micro-impeller dilakukan pada 5-axis micromilling seperti terlihat pada Gambar 4.59.



Gambar 4.59 (a). 5-axis micromilling (b) 5-axis micromilling dengan sistem pengontrolan. (1) 5-axis Micromilling (2) DS 102 Controller (3) PC ter-install DSControl Win

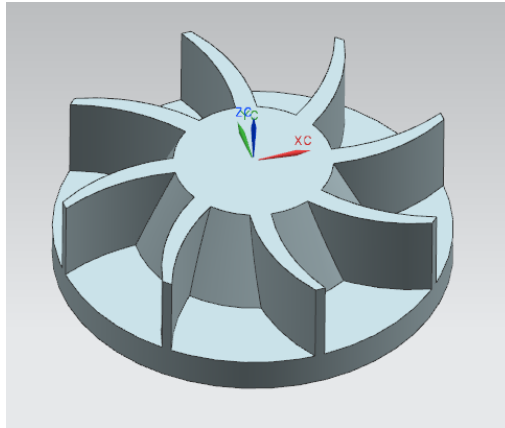
Tabel 4.7 Spesifikasi motor penggerak masing-masing sumbu

No	Sumbu	Type	Stroke	Positioning Accuracy	Resolution
1.	X	High Resolution Motorized Crossed Roller XY Axis	20 mm	5 μm for one direction	50 nm
2.	Y	High Resolution Motorized Crossed Roller XY Axis	20 mm	5 μm for one direction	50 nm
3.	Z	Motorized Linear Ball Bearing	30 mm	5 μm for one direction	50 nm
4.	A	Motorized goniometer rotary stage worn gear type	26°	$\pm 0.05^\circ$	0.00125°
5.	C	Motorized goniometer rotary stage worn gear type	360°	$\pm 0.05^\circ$	0.002°

Cutting tools pada mesin micro-milling 5-axis digerakkan menggunakan

4.4.1. Pengembangan desain model micro-impeller berdiameter 2 mm

Micro-impeller yang dikembangkan pada tahap awal riset ini adalah micro-impeller dengan blade yang berbentuk lurus dengan jumlah blade sebanyak 8 blade. Desain dari micro-impeller menggunakan software NX seperti yang terlihat terlihat pada Gambar 4.60 berikut ini.



Gambar 4.60 Desain model micro-impeller dengan diameter 2 mm.

Desain impeller dengan diameter 2 mm ini dibuat dari blank material berukuran 3 mm x 3 mm x 3 mm, yang diproses sehingga memiliki dimensi akhir sebagai berikut :

- Diameter *impeller* : 2 mm
- Tinggi *impeller* : 0.62 mm
- Tebal *blade* : 0.046 mm
- Jarak minimum antara *blade* : 0.2 mm

4.4.2. Pengembangan lintasan pahat untuk micro-impeller berdiameter 2 mm

Pengembangan lintasan pahat micro-impeller dilakukan dengan menggunakan sistem CAD/CAM terintegrasi software NX seperti yang digunakan pada pengembangan mini-impeller sebelumnya. Pengembangan lintasan pahat untuk micro-impeller dengan blade lurus lebih mudah dibandingkan dengan twisted impeller, karena bentuk impeller yang lebih sederhana sehingga gerak makan pahat pun lebih sederhana.

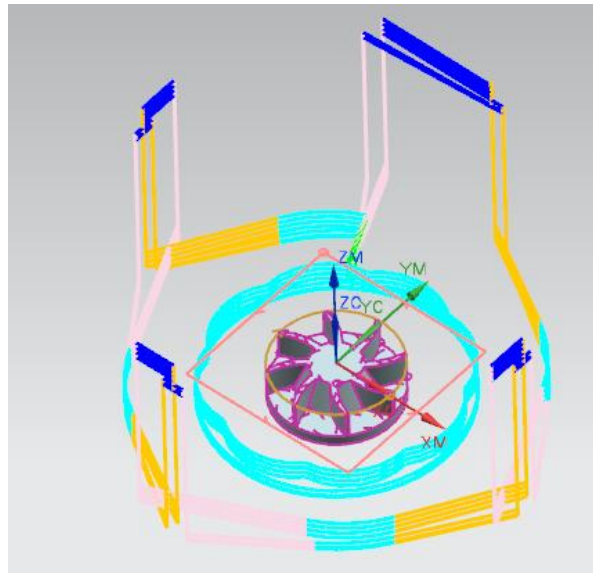
Proses pemesinan yang direncanakan dalam pembuatan micro-impeller ini hanya dalam dua tahapan yaitu proses roughing dan proses finishing. Adapun parameter pemesinan untuk proses roughing Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Parameter pemesinan proses roughing micro-impeller diameter 2 mm

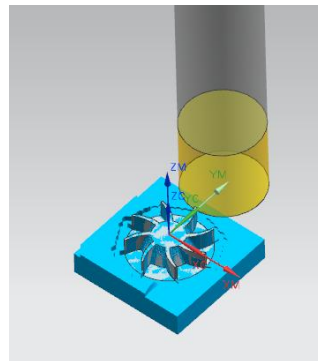
<i>No</i>	<i>Parameter pemesinan</i>	<i>Keterangan</i>
<i>1</i>	<i>Diameter cutting tool</i>	<i>2 mm</i>
<i>2</i>	<i>Tipe cutting tool</i>	<i>Flat end mill</i>
<i>3</i>	<i>Depth of cut</i>	<i>0.1 mm</i>
<i>4</i>	<i>Step over</i>	<i>1 mm</i>
<i>5</i>	<i>Spindle Speed</i>	<i>± 80.000 rpm</i>
<i>6</i>	<i>Feed rate</i>	<i>1 mm/s</i>
<i>7</i>	<i>Tolerance</i>	<i>0.01 mm</i>
<i>8</i>	<i>Hub stock</i>	<i>0 mm</i>
<i>9</i>	<i>Blade stock</i>	<i>0 mm</i>

Berdasarkan parameter pemesinan tersebut, maka dengan menggunakan software NX dapat direncanakan lintasan pahat seperti terlihat pada Gambar 4.61, sedangkan hasil

verifikasi dan simulasi gerakan pahat dapat dilihat pada Gambar 4.62 berikut ini.



Gambar 4.61 Lintasan pahat proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm



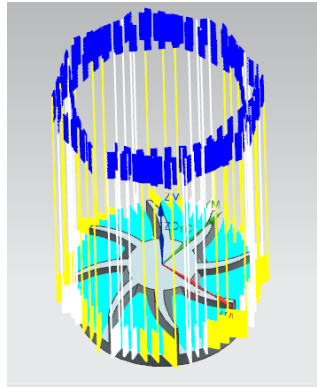
Gambar 4.62 Simulasi proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm

Untuk proses finishing terbagi menjadi dua tahap, yang pertama adalah *finishing* dari *blade* dan *finishing surface* dari permukaan impeller untuk mengurangi efek burr yang terbentuk akibat proses pemotongan sebelumnya. Adapun parameter pemesinan untuk proses finishing seperti terlihat pada Tabel 4.9 berikut ini.

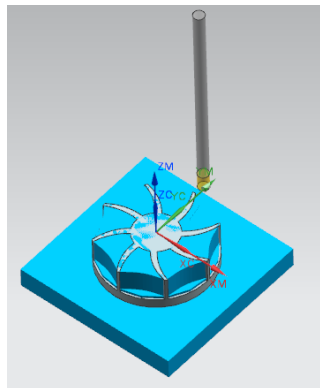
Tabel 4.9 Parameter pemesinan proses finishing micro-impeller diameter 2 mm

No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	<i>Diameter cutting tool</i>	<i>0.1 mm</i>
2	<i>Tipe cutting tool</i>	<i>Flat end mill, nACro</i>
3	<i>Depth of cut</i>	<i>0.01 mm</i>
4	<i>Step over</i>	<i>0.05</i>
5	<i>Spindle Speed</i>	<i>± 80.000 rpm</i>
6	<i>Feed rate</i>	<i>1 mm/s</i>
7	<i>Tolerance</i>	<i>0.01 mm</i>
8	<i>Hub stock</i>	<i>0 mm</i>
9	<i>Blade stock</i>	<i>0 mm</i>

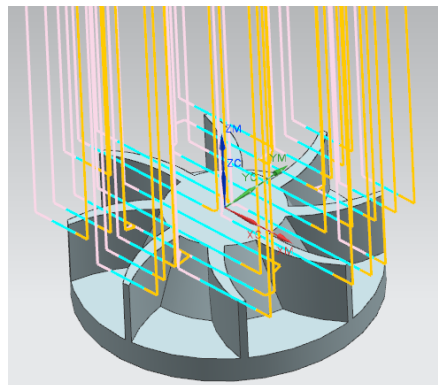
Dari parameter pemesinan tersebut, maka didapatkan lintasan pahat untuk proses finishing blade seperti terlihat pada Gambar 4.63. Hasil verifikasi dan simulasi gerakan pahat terlihat pada Gambar 4.64.



Gambar 4.63 Lintasan pahat proses finishing blade micro-impeller berdiameter 2 mm



Gambar4.64 Simulasi proses roughing micro-impeller berdiameter 2 mm



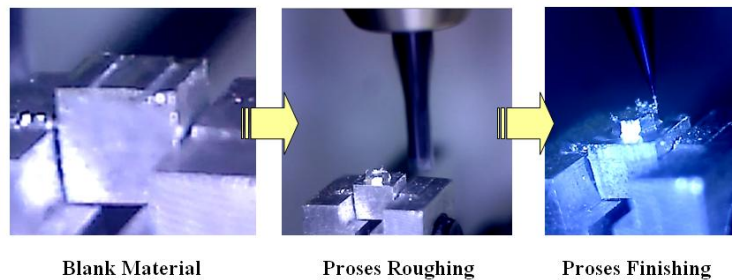
Gambar 4.65 Lintasan pahat proses finishing surface micro-impeller berdiameter 2 mm

4.4.3. Proses pemesinan micro-impeller berdiameter 2 mm

Lintasan pahat yang dikembangkan dengan menggunakan software NX akan menghasilkan sekumpulan titik koordinat tool atau yang dikenal dengan istilah Cutter Location (CL) File. CL-File ini tidak dapat serta merta dimasukkan ke dalam sistem

pengontrol (DSControl-Win) mesin micro-milling 5-axis, karena bentuk format CL-file adalah dalam bentuk .txt, sedangkan DSControl-Win hanya mengenal CL-file dalam bentuk .prg. Selain itu, syntax atau tata penulisan program dari CL-File keluaran software NX berbeda dengan syntax dari DSControl-Win. Sehingga, CL-File dari software NX terlebih dulu melalui tahap post-processing. Pada tahap post-processing juga dilakukan transformasi Workpiece Coordinate System (WCS) menjadi Machine Coordinate System (MCS).

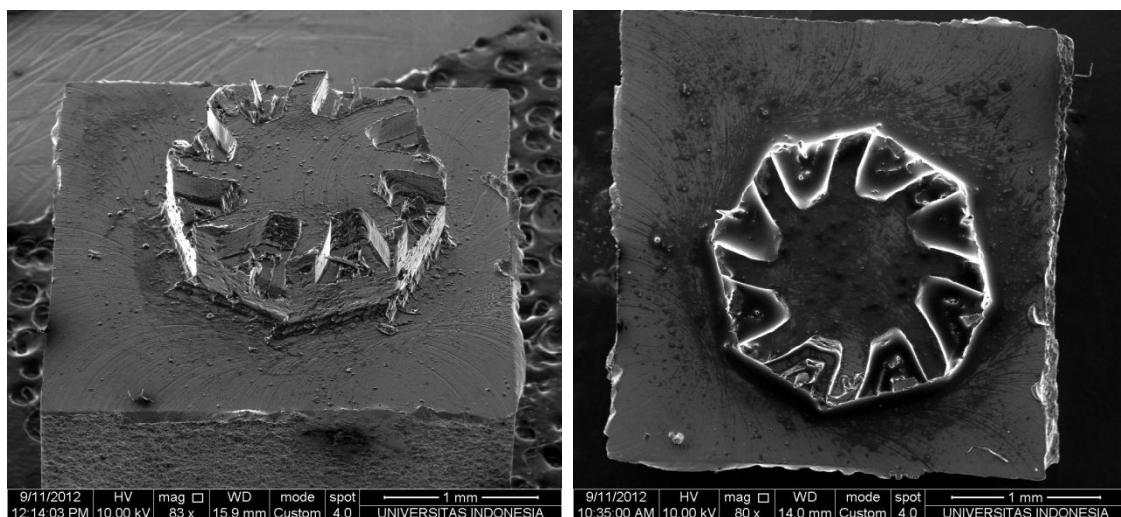
Mesin micro-milling yang digunakan memiliki kemampuan gerak hingga 5 derajat kebebasan (5 sumbu) namun pada proses pemesinan impeller dengan bentuk blade lurus, hanya 3 sumbu XYZ yang digunakan. Alur proses pemesinan dapat dilihat pada skema Gambar 4.66 berikut ini.



Gambar 4.66 Skema alur proses pemesinan micro-impeller berdiameter 2 mm

Untuk memulai proses pemesinan, terlebih dahulu ditentukan titik koordinat 0,0,0 antara benda kerja dengan tool. Proses ini cukup rumit mengingat ukuran dari tool yang sangat kecil. Diperlukan kesabaran dan ketelitian yang tinggi dan diperlukannya Digital Camera Microscope untuk melihat saat tool menyentuh benda kerja.

Hasil pemesinan micro-impeller dapat terlihat dengan jelas bila difoto menggunakan SEM, seperti terlihat pada Gambar 4.67. Terlihat pada gambar ini, micro-impeller dapat dibuat cukup baik. Namun, terlihat banyaknya burr yang terjadi sebagai akibat dari proses pemotongan dan geram hasil pemotongan yang tersisa pada permukaan hasil pemesinan.



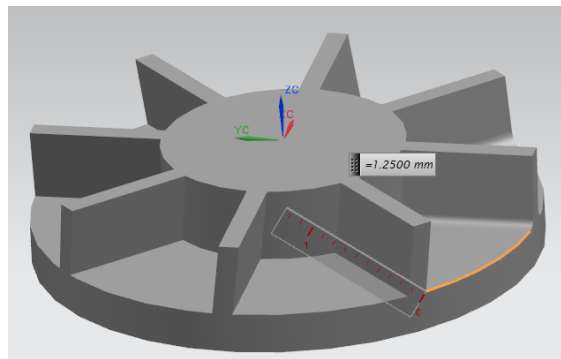
Gambar 4.67 Micro-impeller berdiameter 2 mm

Pengecekan dan pengukuran kualitas pemesinan micro-impeller masih belum dapat dilakukan mengingat keterbatasan ukuran *touch probe* dari mesin CMM yang ada. Sehingga perlu suatu metode pengecekan dan pengukuran kualitas pemesinan micro-impeller yang telah dihasilkan.

5.5. Pengembangan *incline micro-impeller* berdiameter 2.5 mm

4.5.1. Pengembangan desain *inclined micro-impeller* berdiameter 2.5 mm

Pada tahap ini, dikembangkan desain micro-impeller berdiameter 2.5 mm dengan blade berjumlah 8 buah yang memiliki kemiringan sebesar 8° . Gambar desain dari micro-impeller seperti terlihat pada Gambar 4.68 berikut ini.



Gambar 4.68 Desain micro-impeller 2.5 mm dengan kemiringan blade sebesar

Desain impeller memiliki dimensi akhir sebagai berikut :

- Diameter *impeller* : 2.5 mm
- Tinggi *impeller* : 0.3 mm
- Tebal *blade* : 0.01 mm
- Jarak minimum antara *blade* : 0.36 mm
- Kemiringan *blade* : 8°

4.5.2. Pengembangan lintasan pahat untuk *inclined micro-impeller*.

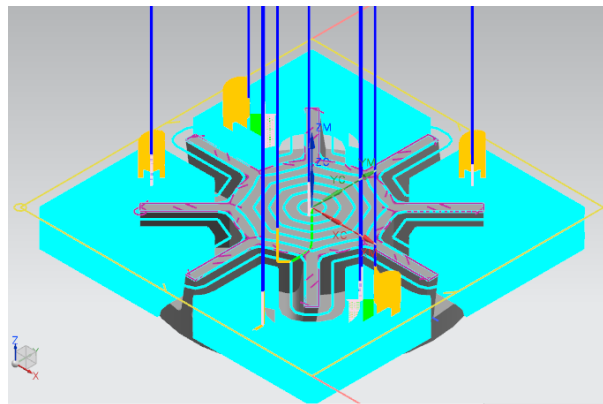
Pengembangan lintasan pahat untuk *inclined micro-impeller* harus disesuaikan dengan kemampuan dari mesin micro-milling. Karena kisaran kerja dari sumbu Y hanya 20 mm dan offset yang ada pada mesin micro-milling, sehingga seluruh kemungkinan gerak pahat yang tidak dapat dilakukan oleh mesin harus diminimalisir dengan cara pemilihan tool dan metode pemesinan yang sesuai.

Proses pemesinan yang direncanakan dalam pembuatan micro-impeller ini hanya dalam dua tahapan yaitu proses *roughing* dan proses *finishing*. Adapun parameter pemesinan untuk proses *roughing* Tabel 4.10.

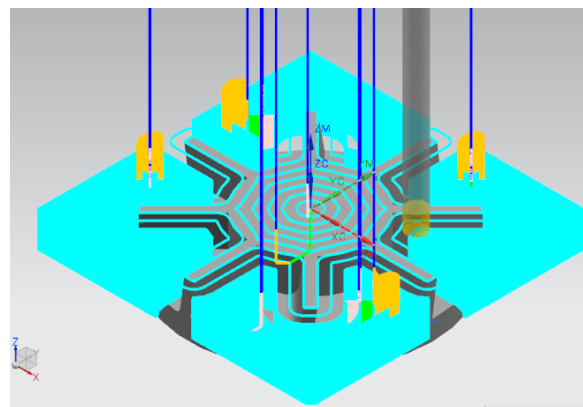
Tabel 4.10 Parameter pemesinan proses roughing inclined micro-impeller diameter 2.5 mm

No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	Diameter cutting tool	0.2 mm
2	Tipe cutting tool	Flat end mill
3	Depth of cut	0.01 mm
4	Step over	1 mm
5	Spindle Speed	± 80.000 rpm
6	Feed rate	1 mm/s
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	0 mm
9	Blade stock	0 mm

Berdasarkan parameter pemesinan tersebut, maka dengan menggunakan software NX dapat direncanakan lintasan pahat seperti terlihat pada Gambar 2.61, sedangkan hasil verifikasi dan simulasi gerakan pahat dapat dilihat pada Gambar 2.62 berikut ini.



Gambar 4.69 Lintasan pahat proses roughing inclined micro-impeller berdiameter 2.5 mm



Gambar 4.70 Simulasi proses roughing inclined micro-impeller berdiameter 2 mm

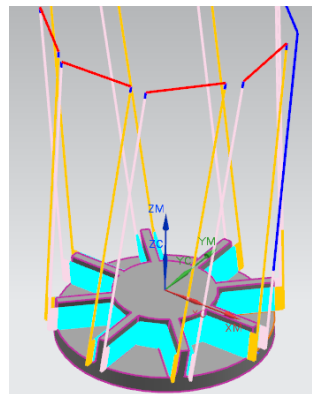
Untuk proses finishing terbagi menjadi dua tahap, yang pertama adalah *finishing* dari *blade* dan *finishing surface* dari permukaan impeller untuk mengurangi efek burr yang terbentuk akibat proses pemotongan sebelumnya. Adapun parameter pemesinan untuk proses

finishing seperti terlihat pada Tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Parameter pemesinan proses finishing micro-impeller diameter 2.5 mm

No	Parameter pemesinan	Keterangan
1	Diameter cutting tool	0.1 mm
2	Tipe cutting tool	Flat end mill, nACro
3	Depth of cut	0.01 mm
4	Step over	0.05
5	Spindle Speed	± 80.000 rpm
6	Feed rate	0.25 mm/s
7	Tolerance	0.01 mm
8	Hub stock	0 mm
9	Blade stock	0 mm

Dari parameter pemesinan tersebut, maka didapatkan lintasan pahat untuk proses finishing blade seperti terlihat pada Gambar 2.63.



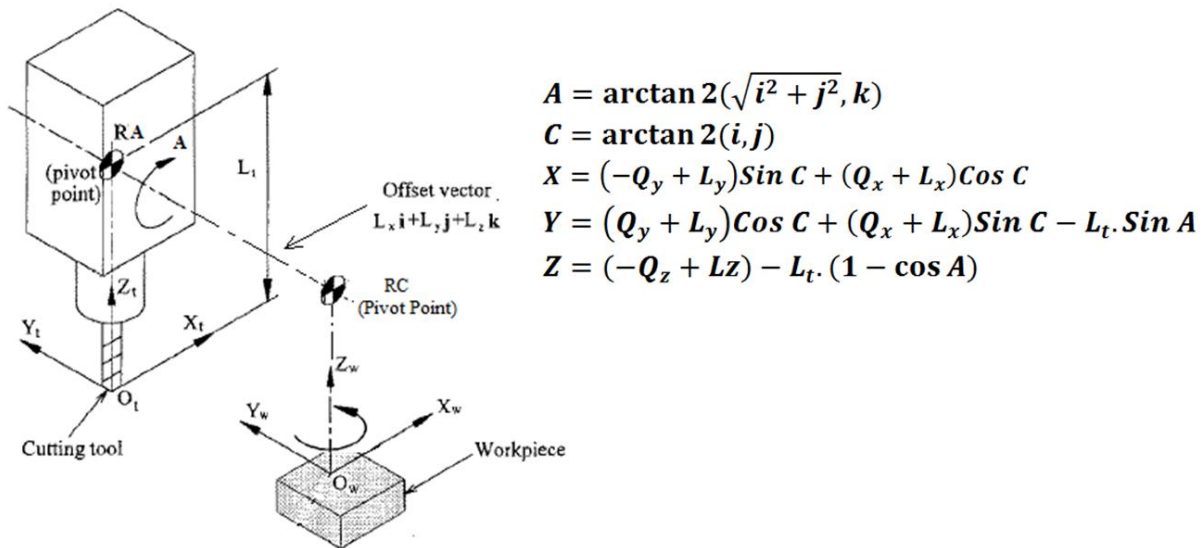
Gambar 4.71 Lintasan pahat proses finishing blade micro-impeller berdiameter 2 mm

4.5.3. Proses pemesinan inclined micro-impeller 2,5 mm

Lintasan pahat yang dikembangkan dengan menggunakan software NX akan menghasilkan sekumpulan titik koordinat tool atau yang dikenal dengan istilah Cutter Location (CL) File. CL-File ini tidak dapat serta merta dimasukkan ke dalam sistem pengontrol (DSControl-Win) mesin micro-milling 5-axis, karena bentuk format CL-file adalah dalam bentuk .txt, sedangkan DSControl-Win hanya mengenal CL-file dalam bentuk .prg. Selain itu, syntax atau tata penulisan program dari CL-File keluaran software NX berbeda dengan syntax dari DSControl-Win. Sehingga, CL-File dari software NX terlebih dulu melalui tahap post-processing. Pada tahap post-processing juga dilakukan transformasi Workpiece Coordinate System (WCS) menjadi Machine Coordinate System (MCS).

Untuk menghasilkan kemiringan blade, maka kelima sumbu dari micro-milling akan bergerak sesuai dengan CL File keluaran dari Software NX. CL File tersebut berisikan nilai koordinat x,y,z, i, j dan k yang berbasis pada Workpiece Coordinate System (WCS). Nilai koordinat tersebut harus diubah ke dalam bentuk nilai sumbu linear X, Y, Z dan sumbu rotasi A dan C

yang berbasis pada Machine Coordinate System (MCS), dengan menggunakan metode inversed kinematik.

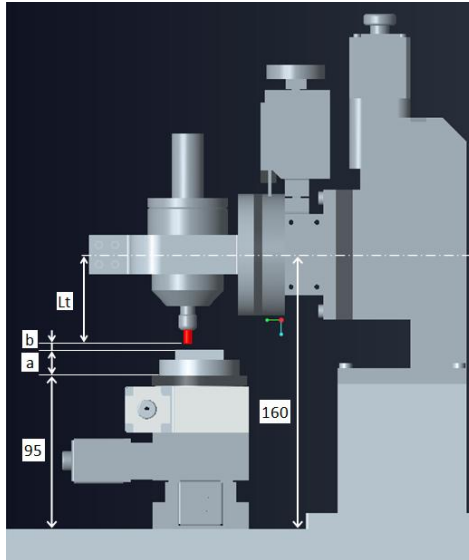


Gambar 4.72 Inverse kinematik dari Machine Coordinate System terhadap Workpiece Coordinate System

L_x , L_y , dan L_z adalah offset dari Machine Coordinate System terhadap Workpiece Coordinate System. Nilai L_x dan L_y diukur dari jarak antara ujung tool dan titik pusat dari sumbu putar C, yang merupakan titik nol dari koordinat dari workpiece. Nilai L_x dan L_y akan selalu sama selama konstruksi dari mesin tidak diubah, dimana $L_x = -7.75$ mm dan $L_y = -1.5$.

Nilai L_z sangat dipengaruhi oleh pahat yang dipasang dan kedalamannya di dalam spindle. L_z diukur dengan cara menggerakkan sumbu Z dari titik 0 hingga menyentuh permukaan benda kerja. Nilai gerak sumbu Z ini akan terbaca pada tampilan DSCControl Win dan ditetapkan sebagai L_z .

L_t adalah jarak dari ujung pahat ke titik putar dari sumbu A. Nilai L_t dicari dengan mengurangkan tinggi titik pusat sumbu A dengan bagian lain dari konstruksi mesin micro-milling seperti terlihat pada Gambar.... berikut ini. Nilai a adalah jarak antara permukaan sumbu putar C terhadap permukaan benda kerja, nilai b adalah sama dengan L_z .



Gambar 4.73. Dimensi Micro-milling machine untuk penghitungan panjang Lt (dalam mm)

5. 6. Analisa Pemesinan Micro-impeller

4.6.1. Analisa Parameter Pemesinan Micro-Impeller

Dengan diameter tool yang sangat kecil yaitu 0.1 mm dan 0.2 mm, maka proses pemesinan harus dilakukan dengan kecepatan spindle yang sangat tinggi (High speed machining), feed-rate yang rendah dan depth per cut yang sangat kecil. Bila parameter tidak sesuai, maka tool akan mudah sekali mengalami keausan, bahkan dapat menyebabkan tool patah.

Pemilihan parameter pemesinan akan mempengaruhi geram yang terjadi, feed-rate yang rendah akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih baik namun dapat menimbulkan terbentuknya geram kontinyu dan build-up edge pada permukaan pahat.

Parameter pemesinan juga mempengaruhi pembentukan burr pada micro-impeller yang mengurangi kualitas hasil pemesinan.

4.6.2. Analisa Waktu pemesinan Micro-Impeller

Proses pemesinan dilakukan dengan diameter tool yang kecil, feed-rate yang sangat rendah dan depth per cut yang sangat kecil mengakibatkan waktu pemesinan menjadi sangat lama. Pembuatan micro-impeller dengan blade datar berukuran 2 mm memakan waktu 16 jam, sedangkan pembuatan micro-impeller dengan blade dengan kemiringan 8°, menghabiskan waktu kurang lebih 26 jam. Waktu tersebut belum termasuk persiapan dan identifikasi nilai offset Lz yang memakan waktu sekitar 2 hingga 3 jam, tergantung pada diameter tool yang digunakan. Semakin kecil tool yang digunakan, maka semakin sulit penentuan nilai offset Lz. Hal ini dikarenakan pengidentifikasian titik kontak antara tool dengan benda kerja, dilakukan secara visual.

Penggunaan tool dengan diameter yang lebih besar sangatlah disarankan karena akan mengurangi waktu pemesinan. Namun, yang perlu diperhatikan adalah penentuan check geometri untuk bagian-bagian yang lebih kecil dan sulit dijangkau oleh diameter tool yang besar. Karena dapat mengakibatkan pemotongan yang berlebihan sehingga merusak benda kerja yang dihasilkan.

4.6.3. Analisa Lintasan Pahat

Pemilihan strategi pemesinan dan diameter tool akan sangat mempengaruhi lintasan pahat yang dihasilkan oleh CAM software. Keterbatasan gerak dari mesin micro-milling terutama untuk melakukan operasi pemesinan 5 axis, mengharuskan pemilihan strategi yang tepat pada saat pengembangan lintasan pahat. Tool dengan bentuk ball nose merupakan tool yang tepat untuk melakukan proses pemesinan micro-impeller.

5.7. Pemilihan Parameter Pemesinan dengan Kekasaran Permukaan yang terbaik dan dengan burr minimum.

Pengujian parameter pemesinan ini dilakukan untuk menentukan parameter pemesinan terbaik yang akan dijadikan acuan untuk proses pemesinan selanjutnya. Parameter variable yang diambil adalah spindle speed, feed-rate dan lama waktu pemesinan. Analisa parameter pemesinan dilakukan dengan cara membandingkan kekasaran permukaan dan burr yang terjadi pada benda kerja.

Analisa hubungan antara spindle speed, feed-rate dan waktu pemesinan terhadap kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan metode statistika, ANOVA. Sedangkan hubungan antara ketiga parameter tersebut terhadap terbentuknya burr dilakukan dengan menganalisa secara visual.

Terdapat dua jurnal yang menjelaskan penelitian yang menggunakan benda kerja berbahan aluminium dan dengan diameter tool 0.2 mm [Kang et al. & Vázquez et al.]. Adapun parameter pemesinan yang digunakan dirangkumkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Referensi parameter pemesinan yang telah dilakukan untuk benda kerja aluminium dengan diameter tool 0.2 mm

Tool Material	Tool Dia (mm)	Spindle Speed (RPM)	Feed per tooth (mm/tooth)	Feed rate (mm/min)	Feed rate (mm/s)	Cutting speed (m/min)	Depth of cut (mm)	Kondisi
Carbide	0.2	12000	0.001	24	0.4	7536	0.02	cool
TiAlN Coated	0.2	62000	0.005	620.00	10.33	38936	0.002	Dry and wet

Selain itu, perbandingan parameter pemesinan juga diperhitungkan dari data rekomendasi dari pembuat tool. Persamaan parameter pemesinan untuk operasi milling seperti terlihat pada Gambar 4.74 berikut.

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

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \text{ (rev/min)}$$

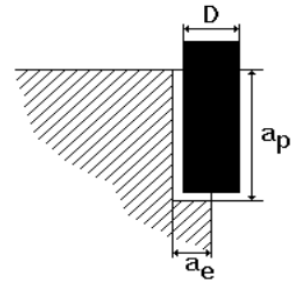
$$vf = fz \cdot z \cdot n = f \cdot n \text{ (mm/min)}$$

$$h_m = fz \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D}} \text{ (mm)} \frac{a_e}{D} < 0,3$$

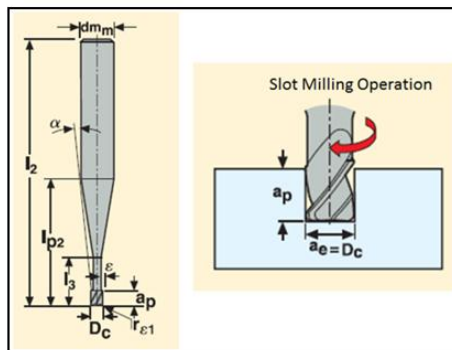
$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot vf}{1000} \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

Legend

- v_c = Cutting speed (m/min)
- n = Spindle speed (rev/min)
- v_f = Feed speed (mm/min)
- a_p = Axial depth of cut (mm)
- a_e = Radial depth of cut (mm)
- f = Feed per rev (mm/rev)
- z = Number of teeth
- f_z = Feed per tooth (mm/tooth)
- D = Cutter diameter (mm)
- h_m = Average chip thickness (mm)
- Q = Material removal rate (cm³/min)



Gambar 4.74. Persamaan perhitungan parameter pemesinan untuk proses milling



Type	Part No.	Dimensions in mm							α°	Z_n
		D_c	dm_m	l_2	l_3	a_p	ϵ	r_{e1}		
JM905-MEGA-T 3	9050010-MEGA-T	0.10	3	40	—	0.15	—	—	14°15'	2
	9050015-MEGA-T	0.15	3	40	—	0.25	—	—	14°	2
	905002-MEGA-T	0.20	3	40	—	0.30	—	—	13°45'	2
	905003-MEGA-T	0.30	3	40	—	0.45	—	—	13°30'	2
	905004-MEGA-T	0.40	3	40	—	0.60	—	—	13°	2

Gambar 4.75. Dimensi pahat SECO 905002 Mega-T

First choice: End mill = JM905 (shank dia. 3mm) and JM920 (shank dia. 6mm)
 Alternative: Ball nose = JM915 (shank dia. 3mm) and JM925 (shank dia. 6mm)

Seco Material group No.	D _c	Slotting a _e /D _c = 100%, v _c = 400 m/min or max RPM in machine									
		f _z	a _e	a _p	a _p ML	a _p L	a _p TL	a _p XL	a _p SL	a _p XXL	a _p XSL
16 Aluminium	0,10	0,0013	0,10	0,025	–	–	–	–	–	–	–
	0,15	0,0020	0,15	0,038	–	–	–	–	–	–	–
	0,20	0,0026	0,20	0,050	–	–	–	–	–	–	–
	0,30	0,0039	0,30	0,075	–	–	–	–	–	–	–
	0,40	0,0052	0,40	0,100	–	–	–	–	–	–	–
	0,50	0,0065	0,50	0,125	0,110	0,095	0,085	0,075	–	–	–
	0,60	0,0078	0,60	0,150	0,132	0,114	0,102	0,090	–	–	–
	0,80	0,0104	0,80	0,200	0,176	0,152	0,136	0,120	–	–	–
	1,00	0,0130	1,00	0,250	0,220	0,190	0,170	0,150	0,125	0,050	0,025
	1,20	0,0156	1,20	0,300	0,264	0,228	0,204	0,180	–	–	–
	1,50	0,0195	1,50	0,375	0,330	0,285	0,255	0,225	0,188	0,075	0,038
	1,80	0,0234	1,80	0,450	0,396	0,342	0,306	0,270	0,225	–	–
	2,00	0,0260	2,00	0,500	0,440	0,380	0,340	0,300	0,250	0,100	0,050

First choice: End mill = JM905 (shank dia. 3mm) and JM920 (shank dia. 6mm)
 Alternative: Ball nose = JM915 (shank dia. 3mm) and JM925 (shank dia. 6mm)

Seco Material group No.	D _c	Slotting a _e /D _c = 100%, v _c = 400 m/min or max RPM in machine									
		f _z	a _e	a _p	a _p ML	a _p L	a _p TL	a _p XL	a _p SL	a _p XXL	a _p XSL
16 Aluminium	0,10	0,0013	0,10	0,025	–	–	–	–	–	–	–
	0,15	0,0020	0,15	0,038	–	–	–	–	–	–	–
	0,20	0,0026	0,20	0,050	–	–	–	–	–	–	–
	0,30	0,0039	0,30	0,075	–	–	–	–	–	–	–
	0,40	0,0052	0,40	0,100	–	–	–	–	–	–	–
	0,50	0,0065	0,50	0,125	0,110	0,095	0,085	0,075	–	–	–
	0,60	0,0078	0,60	0,150	0,132	0,114	0,102	0,090	–	–	–
	0,80	0,0104	0,80	0,200	0,176	0,152	0,136	0,120	–	–	–
	1,00	0,0130	1,00	0,250	0,220	0,190	0,170	0,150	0,125	0,050	0,025
	1,20	0,0156	1,20	0,300	0,264	0,228	0,204	0,180	–	–	–
	1,50	0,0195	1,50	0,375	0,330	0,285	0,255	0,225	0,188	0,075	0,038
	1,80	0,0234	1,80	0,450	0,396	0,342	0,306	0,270	0,225	–	–
	2,00	0,0260	2,00	0,500	0,440	0,380	0,340	0,300	0,250	0,100	0,050

Gambar 4.76. Parameter pemesinan yang direkomendasikan

Bila berdasarkan perhitungan feed-rate dari rekomendasi produsen pahat, maka proses pemotongan sebenarnya dapat dilakukan dengan kecepatan makan yang lebih besar seperti terlihat pada tabel.... Namun, pada kenyataannya pahat tersebut mengalami patah bila dilakukan proses pemotongan dengan feed-rate sebesar 2 mm/s setelah beberapa menit. Berdasarkan rekomendasi dari produsen tool, dept per cut untuk slot milling adalah 0.05 mm. Namun, ketika diuji coba terlebih dahulu dengan dept per cut sebesar 0.02, terlihat tool mengalami gaya yang tidak wajar. Hal ini terlihat dari gerakan pahat yang ‘kepayahan’ dan bunyi proses pemotongan pun terdengar ‘berat’. Bila dikaitkan dengan teori yang telah umum, gaya pemotongan yang besar akan mengurangi kualitas dari kekasaran permukaan dan akan menghasilkan burr yang lebih banyak. Maka, untuk mendapatkan cutting parameter terbaik dan memungkinkan untuk digunakan, makan depth per cut dikurangi menjadi yaitu 0.01 mm.

Tabel 4.13. Penentuan feed-rate berdasarkan rekomendasi produsen pahat.

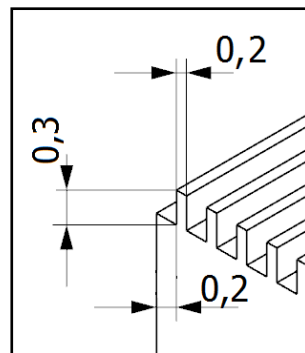
Feed-rate (mm/s)	Flute	spindle speed (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth) Manufacturer Recommendation
3.03	2	35,000	0.0026
6.07	2	70,000	0.0026
8.23	2	95,000	0.0026

Dari hasil pengumpulan data referensi, maka ditentukan level parameter yang akan digunakan dalam pengujian kali ini adalah seperti terlihat pada Tabel.... berikut ini. Depth of cut dibuat konstan yaitu 0.01 mm (10 μ m).

Tabel 4.14. Parameter pemesinan

Spindle speed (rpm)	Feed-rate (mm/s)	Machining Time (minutes)
n	f	t
35,000	0,05	15
60,000	0,5	30
90,000	1	45

Benda kerja pada pengujian ini adalah AA 7075 sebagai salah satu material benda kerja yang akan digunakan pada penelitian selanjutnya. Alumunium Alloy 7075 dikenal sebagai salah satu jenis alumunium yang banyak digunakan untuk pembuatan cetakan injection molding terutama sebagai prototipe. Micro-channel memiliki aspek rasio sebesar 1.5, dengan lebar channel sesuai dengan diameter tool (0.2 mm) dan ketinggian 0.3 mm dibuat pada benda kerja berukuran 12 mm x 12 mm x 3 mm, seperti terlihat pada Gambar.... berikut ini.



Gambar 4.77. Desain micro-channel

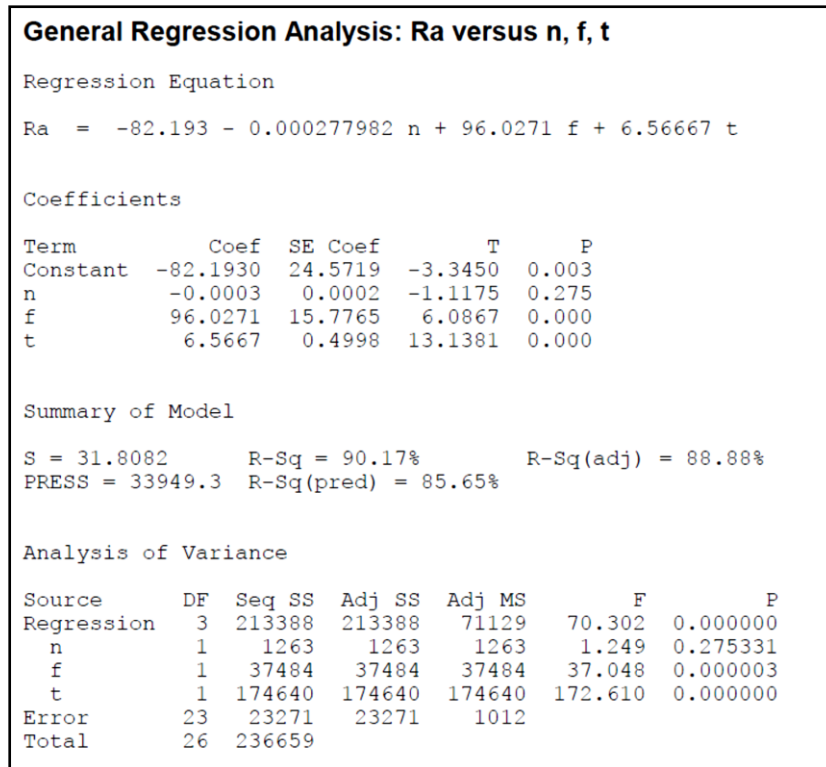
Tool yang digunakan adalah Mini Seco-Jabro 905002 yang berbentuk flate end-mill dengan 2 flute dan berdiameter 2 mm, terbuat dari Solid carbide dengan berlapis Mega-T.

Setelah proses pemesinan micro-channel, selanjutnya dilakukan pengukuran kekasaran permukaan pada micro-channel yang dihasilkan saat 15 menit, 30 menit dan 45 menit seperti terlihat pada Tabel 4.15. berikut ini.

Tabel 4.15. Hasil pengukuran nilai kekasaran permukaan (Ra)

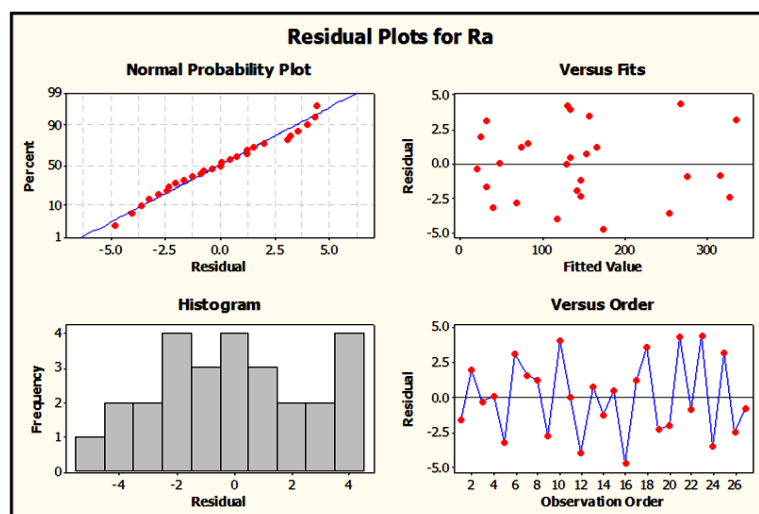
RUN	Spindle speed (rpm)	Feed-rate (mm/s)	Machining Time (minutes)	Surface Roughness (nm)
	n	f	t	Ra
1	35,000	0.05	15	30
2	70,000	0.05	15	28
3	95,000	0.05	15	20
4	35,000	0.5	15	48
5	70,000	0.5	15	37
6	95,000	0.5	15	35
7	35,000	1	15	85
8	70,000	1	15	76
9	95,000	1	15	66
10	35,000	0.05	30	138
11	70,000	0.05	30	129
12	95,000	0.05	30	115
13	35,000	0.5	30	155
14	70,000	0.5	30	146
15	95,000	0.5	30	135
16	35,000	1	30	170
17	70,000	1	30	168
18	95,000	1	30	160
19	35,000	0.05	45	145
20	70,000	0.05	45	140
21	95,000	0.05	45	139
22	35,000	0.5	45	275
23	70,000	0.5	45	273
24	95,000	0.5	45	251
25	35,000	1	45	339
26	70,000	1	45	325
27	95,000	1	45	315

Dengan menggunakan perangkat lunak statistik, data dari tiap-tiap hasil pemotongan dimasukkan dan diolah dengan menggunakan metode ANOVA. Pada Gambar 4.83 adalah hasil perhitungan Analisa General Regresion, terlihat bahwa nilai observasi (F) dari eksperimen adalah 70.309. Sedangkan berdasarkan Tabel distribusi F, diketahui bahwa nilai kritis pada tingkat signifikan 0.05 adalah $F_{0.05, 6, 20} = 2.6$. Nilai ini lebih rendah dari pada nilai observasi, $F=70.309$. Sementara itu, dari hasil perhitungan juga dapat diketahui bahwa nilai P dari perhitungan data adalah 0.003, yang lebih kecil dari tingkat kepercayaan 0.005. Kedua nilai F dan P, memberikan bukti statistik bahwa hipotesa 0 ditolak. Yang memberikan kesimpulan bahwa setidaknya terdapat satu parameter bebas dari spindle speed spindle speed (n), feedrate (f), dan waktu pemesinan (t) yang memberikan kontribusi signifikan terhadap model.



Gambar 4.78. Tampilan hasil perhitungan General Regression Analysis

Pengetesan kecukupan data dari model dilakukan berdasarkan Regular residual plot dari Ra sebagai hasil perhitungan dari perangkat lunak seperti terlihat pada Gambar 4.79. Gambar ini terdiri dari probabilitas normal, residual terhadap fitted values, frekwensi residual dan residual dalam urutan waktu. Dari gambar residual plot terlihat bahwa residual tidak terstruktur atau acak, tidak memiliki pola tertentu dan tidak berhubungan dengan variabel yang lain. Hal ini dapat disimpulkan bahwa model dari eksperimen ini dapat diterima.

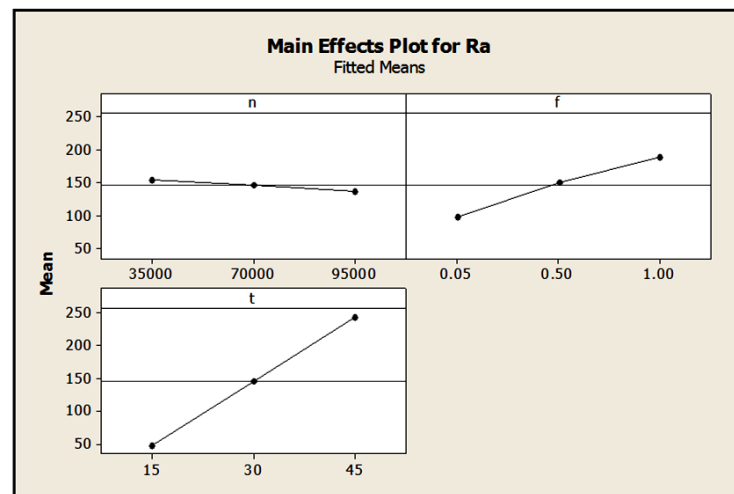


Gambar 4.79. Residual Plots terhadap kekasaran permukaan (Ra)

Cara sederhana untuk menentukan parameter mana yang paling berpengaruh terhadap kekasaran permukaan adalah dengan melihat Gambar 4.80. Main Effect Plot. Gambar tersebut menunjukkan bahwa permukaan yang baik dapat dihasilkan dengan meningkatkan

spindle speed dan mengurangi feed-rate. Selanjutnya, gambar tersebut menunjukkan bahwa waktu pemesinan adalah parameter yang paling berpengaruh terhadap kekasaran permukaan sebagai akibat dari keausan pada pahat.

Nilai-t digunakan untuk menganalisa kontribusi yang signifikan dari variabel bebas terhadap kekasaran permukaan. Hasil perhitungan nilai-t untuk masing-masing parameter spindle speed (n), feed-rate (f) dan waktu pemesinan (t) adalah 1.1175, 6.0867 dan 13.1381. Nilai-t hasil perhitungan data eksperimen tersebut lalu dibandingkan dengan nilai-t kritis yang diambil dari Tabel statistik nilai-t $t_{0,025, 20} = 2.086$. Dari perbandingan nilai-t, dapat disimpulkan bahwa feed-rate(f) dan waktu pemesinan (t) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan (R_a), karena nilai-t dari feed-rate dan waktu pemesinan lebih besar dari nilai-t $t_{0,025, 20} = 2.086$.



Gambar 4.80. Main effect plot terhadap kekasaran permukaan (R_a)

Analisa statistik juga dilakukan dengan menggunakan General Linear Model, untuk melihat interaksi antar parameter seperti terlihat pada Gambar 4.81 berikut ini.

General Linear Model: R_a versus n, f, t			
Factor	Type	Levels	Values
n	fixed	3	35000, 70000, 95000
f	fixed	3	0.05, 0.50, 1.00
t	fixed	3	15, 30, 45

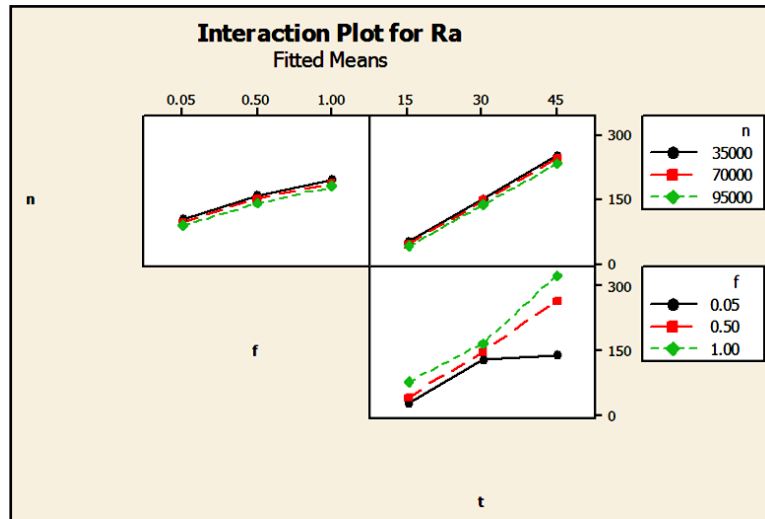
Analysis of Variance for R_a , using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
n	2	1314	1314	657	27.92	0.000
f	2	38015	38015	19007	807.87	0.000
t	2	174642	174642	87321	3711.40	0.000
n*f	4	20	20	5	0.22	0.921
n*t	4	33	33	8	0.35	0.839
f*t	4	22446	22446	5612	238.51	0.000
Error	8	188	188	24		
Total	26	236659				

S = 4.85054 R-Sq = 99.92% R-Sq(adj) = 99.74%

Gambar 4.81. Perhitungan General Linear Model menggunakan Perangkat lunak statistik

Untuk melihat interaksi antara masing-masing parameter dapat ditentukan dengan melihat Interaction plot for R_a seperti terlihat pada Gambar 4.82, yang menunjukkan bahwa terdapat

interaksi antara spindle speed dengan feed-rate dan juga antara feed-rate dengan waktu pemesinan karena garis dari data tidak paralel.

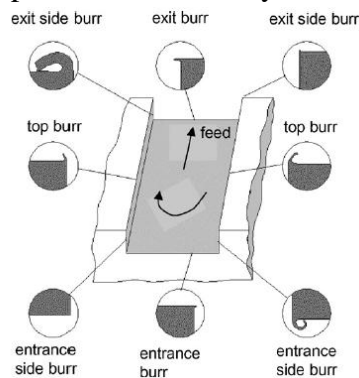


Gambar 4.82. Interaction Plot untuk kekasaran permukaan (R_a)

3. a. Burr Formation

Burr adalah tepian yang kasar yang terjadi akibat proses pemotongan yang tidak sempurna sehingga bagian dari benda kerja masih tertinggal. Burr juga didefinisikan sebagai proyeksi material yang terbentuk sebagai akibat dari aliran plastisitas dari proses pemotongan [Aurich et al]

Pada proses milling Chern menyatakan bahwa tipe dari burr sangat dipengaruhi oleh in-plane exit angle (sudut keluar pada bidang). Hasimura mengklasifikasikan burr berdasarkan lokasi burr, bentuk burr dan mekanisme pembentukan burr, yaitu exit burr, side burr dan top burr.

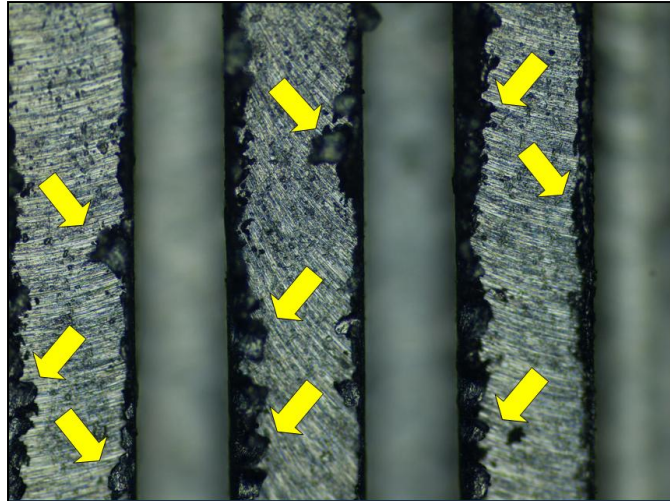


Gambar 4.83 Tipe-tipe burr berdasarkan posisi pembentukannya

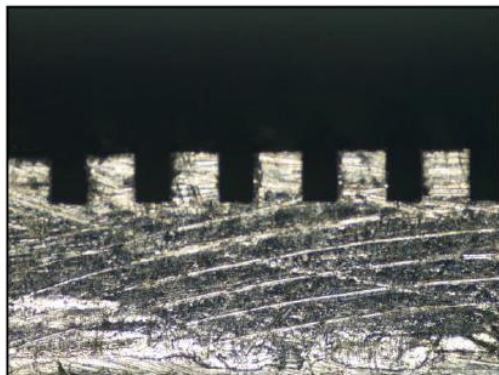
Berdasarkan observasi yang dilakukan oleh Gillespie, burr dapat diminimalisasi dan dicegah dengan cara menguji dan mengamati seluruh proses pemotongan dan parameternya. Mengubah hanya satu parameter pemesinan tidak akan mengatasi pembentukan terjadinya burr. Menurutnya, hal-hal yang utama yang mempengaruhi terbentuknya burr adalah material benda kerja, tool geometry, tool path, tool wear dan parameter pemesinan.

Pada pengujian burr-free ini, akan dilakukan analisa pembentukan burr minimum terhadap pemilihan feed-rate dan tool coating. Parameter pemesinan lainnya seperti spindle-speed, diameter tool, depth of cut dan material benda kerja, diatur konstan.

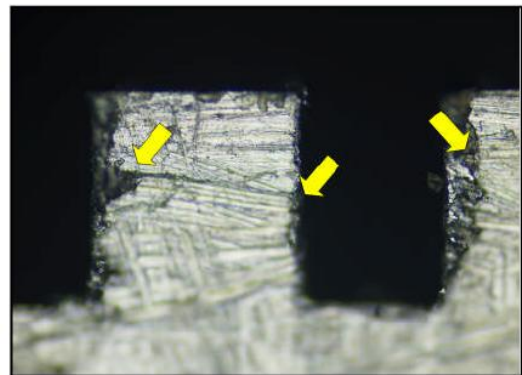
Dengan menggunakan perbesaran 100x pada digital microscope, terlihat dengan jelas bahwa dua tipe burr terbentuk pada micro-channel, yaitu top burr Gambar 4.84 dan exit side burr Gambar 4.85.



Gambar 4.84. Pembentukan top burr pada micro-channel



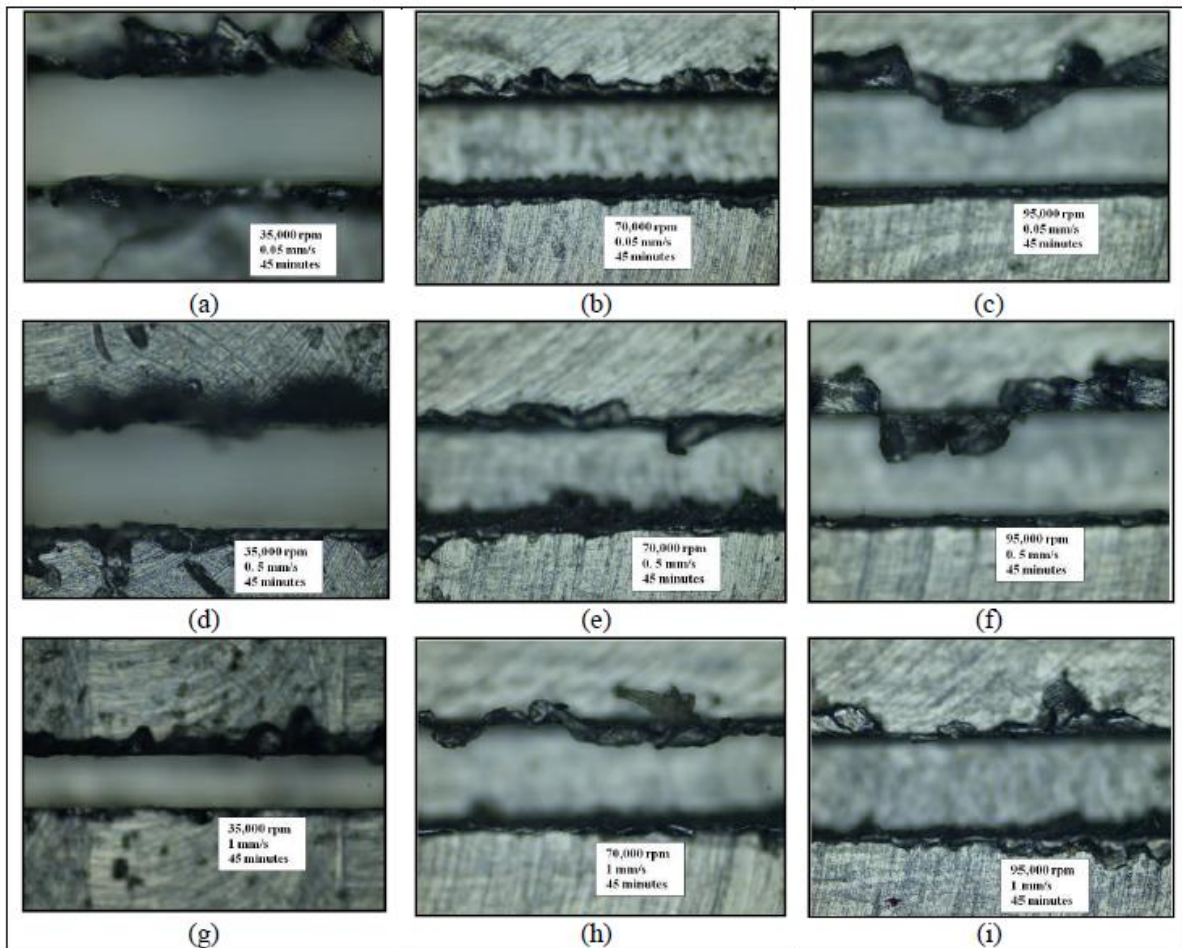
(a)



(b)

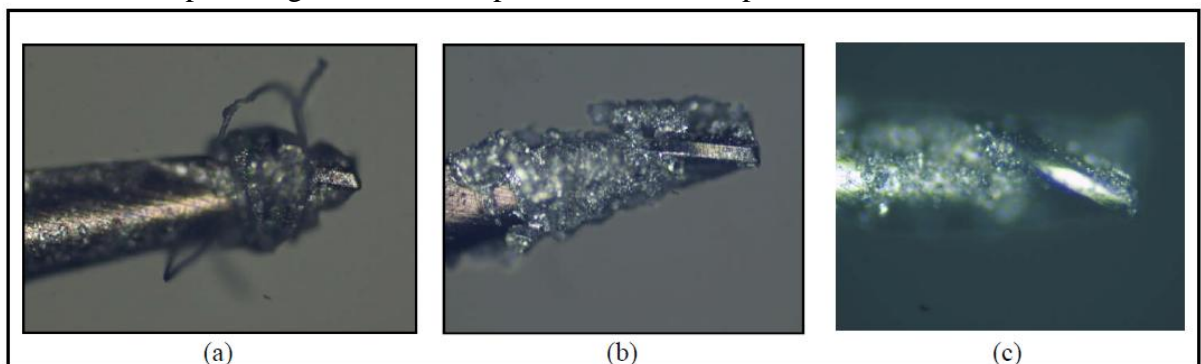
Gambar 4.85. (a) Pandangan samping dari micro-channel (b) Exit Side Burr yang terbentuk pada bagian sisi dari micro-channel

Gambar 4.86 memperlihatkan pembentukan burr untuk masing-masing pemilihan parameter pemesinan. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa pasangan spindle speed dan feed-rate, 70,000 rpm - 0.05mm/s, 70,000 rpm - 0.5 mm/s dan 95,000 rpm - 1 mm/s menghasilkan micro-channel dengan burr minimum.



Gambar 4.86. Padangan atas dari micro-channel untuk setiap parameter pemesinan

Pada proses micro-milling, feed-rate sangatlah kecil bila dibandingkan dengan pemesinan milling konvensional, akibat kecilnya dimensi dari pahat. Pemilihan feed-rate yang terlalu cepat akan mengakibatkan tool mudah patah. Pada pengujian, diketahui bahwa dengan feed-rate sebesar 2 mm/s dapat mengakibatkan tool patah dalam beberapa menit.



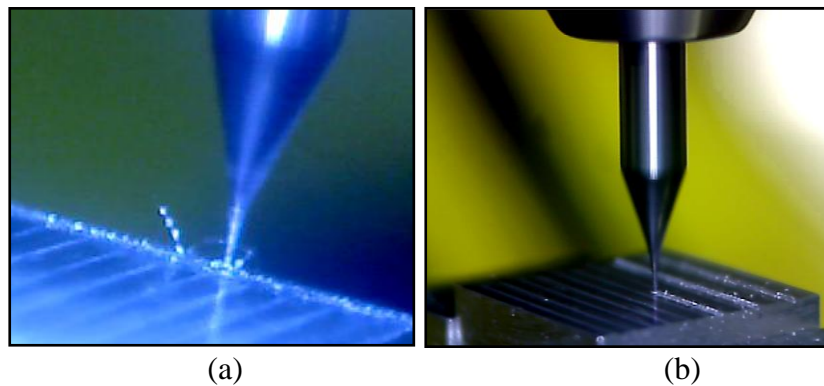
Gambar 4.87. Kondisi pahat setelah 45 menit (a) feed-rate 0.05 mm/s (b) feed-rate 0.5 mm/s (c) feed-rate 1 mm/s

Gambar 4.87 memperlihatkan kondisi pahat setelah 45 menit dari proses pemesinan. Feed-rate yang rendah akan menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih baik namun akan mengakibatkan geram yang kontinyu, sehingga melilit dan membungkus permukaan pahat yang dapat mengganggu proses pemesinan selanjutnya. Geram yang kontinyu tersebut mengubah geometri dari pahat, selain itu geram yang terbentuk dapat saja jatuh atau masuk

ke dalam micro-channel lalu tergilas oleh pahat. Gambar memperlihatkan kondisi pahat setelah digunakan selama 45 menit untuk operasi Geram yang kontinyu ini terbentuk saat melakukan proses pemesinan dengan Feed-rate of 0.05 mm/s dan kecepatan spindle 70.000 rpm seperti terlihat pada Gambar 4.87 (a) and Gambar 4.88.(a).

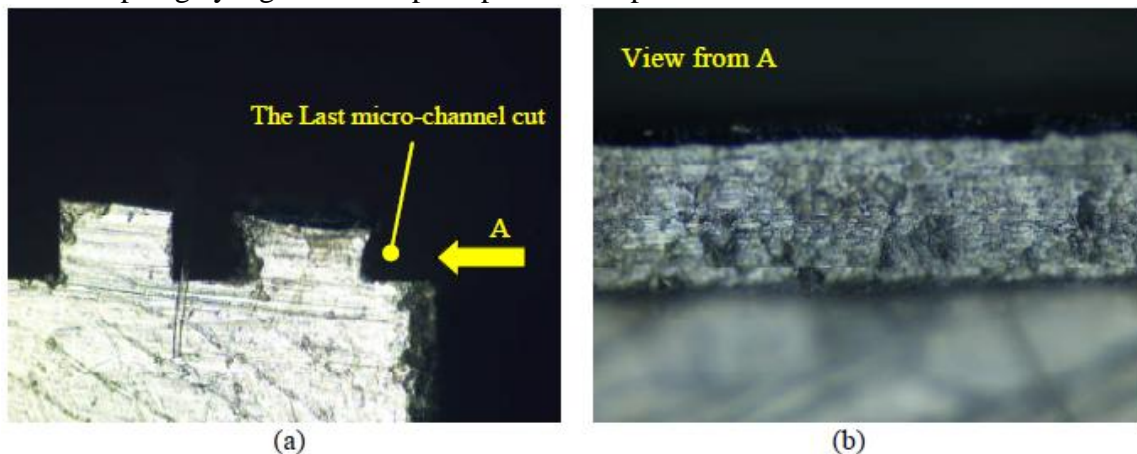
Sementara itu, proses pemotongan dengan Feed-rate of 0.5 mm/s and spindle speed of 70,000 rpm akan mengakibatkan terbentuknya build-up edge (BEU) pada permukaan pahat seperti terlihat pada gambar Gambar 4.87 (b). Walaupun secara teoritis, lapisan tipis dari BUE dapat mengurangi keausan pada pahat namun BUE dapat mengubah geometri dari pahat dan memiliki kemungkinan untuk terurai dan masuk ke dalam micro-channel, yang akan mengganggu proses pemesinan.

Gambar 4.87 (c) memperlihatkan gambar pahat yang saat digunakan untuk proses pemesinan feed-rate 1 mm/s dan kecepatan spindle 95.000 rpm. Pahat terlihat lebih bersih bila dibandingkan dengan yang lainnya. Namun, jika analisis dilakukan dengan membandingkan nilai dari kekasaran permukaan, maka 1 mm/s memiliki kekasaran permukaan yang lebih besar. Hal ini dikarenakan pahat mengalami keausan yang lebih cepat dibanding yang lainnya.



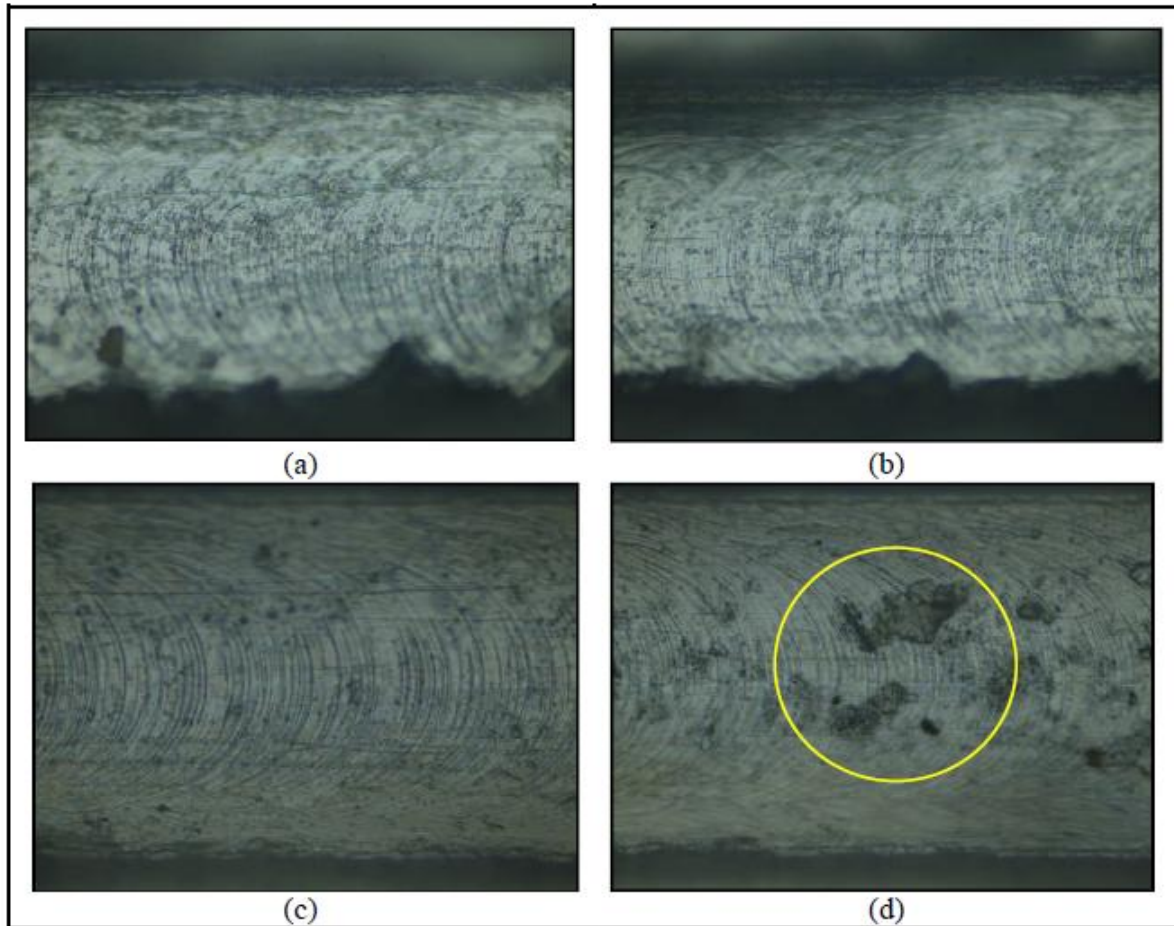
Gambar 4.88.(a) Geram yang kontinyu pada proses pemesinan dengan feed-rate 0.05 mm/s
(b) Proses pemesinan dengan feed-rate 1mm/s.

Untuk mengetahui kualitas permukaan pada dinding micro-channel, maka pemesinan terakhir dari micro-channel ditempatkan pada tepian benda kerja seperti terlihat pada **Fig.17**. Gambar tersebut memperlihatkan dinding dan micro-channel tidak lagi berbentuk segi empat. Hal ini mungkin terjadi dikarenakan perubahan geometri pahat sebagai akibat dari geram yang terlilit dan build-up edge yang terbentuk pada permukaan pahat.



Gambar 4.89. Potongan terakhir dari pemesinan micro-channel

Gambar 4.90 berikut ini memperlihatkan permukaan dasar dari micro-channel. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan untuk setiap parameter pemesinan. Gambar 4.90 (d) memperlihatkan geram yang masuk ke dalam micro-channel dan tergilas oleh pahat.



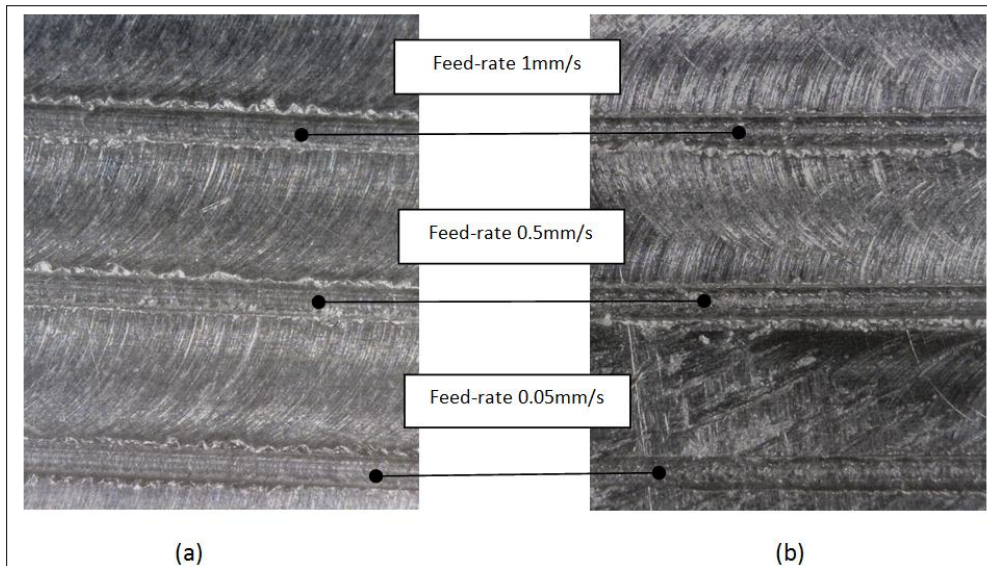
Gambar 4.90. Permukaan dasar dari micro-channel; (a) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 0.05 mm/s; (b) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 0.5 mm/s; (c) Spindle speed 70,000 rpm, feed-rate 1 mm/s; (d) Geram yang tergerus oleh tool

Komparasi pembentukan burr juga dilakukan untuk dua jenis tools dari produsen berbeda dan dengan coating yang berbeda yaitu MEGA-T coated and nACro coated. Masing-masing tool digunakan untuk membuat tiga buah slot dengan kedalaman 0.01 mm atau satu kali gerak pemakanan dengan feed-rate berbeda-beda yaitu 0.05 mm/s, 0.5 mm/s dan 1 mm/s. Tabel 4.16.berikut ini menunjukkan spesifikasi data dari kedua tool tersebut.

Tabel 4.16. Spesifikasi tool.

Spesifikasi :	905002 MEGA-T, SECO Jabro	133.002.00 Inova Tools
Diameter	0.2 mm, 2 flute Flat Endmill	0.2 mm, 2 fluete Flat Endmill
Tools material	Solid cemented carbide	Solid carbide, 65 HRC
Tools coating	MEGA-T coated	nACro Coated

Dari hasil pembuatan slot yang dilakukan pada workpiece terlihat terjadi burr untuk masing-masing slot.



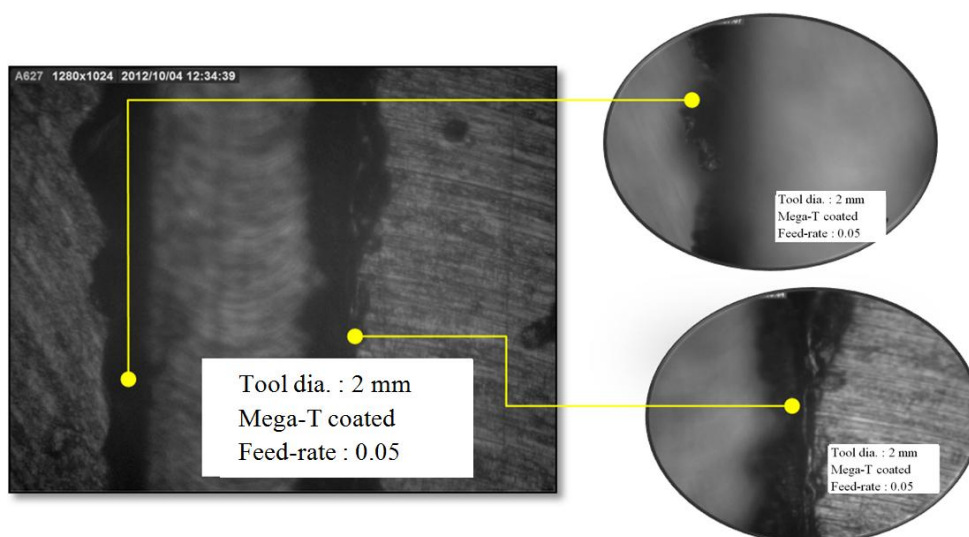
Gambar 4.91. Hasil Pemesinan Slot milling (a) MEGA-T coated (b) nACro coated

Dengan memperhatikan Gambar 4.91 di atas, terlihat bahwa pembentukan burr dipengaruhi oleh coating dan feed-rate yang dipilih.

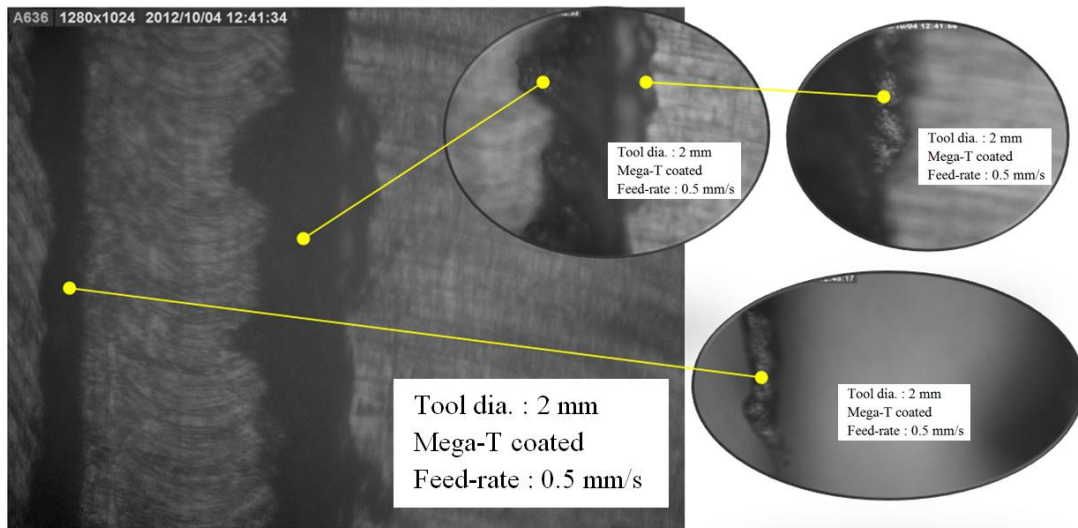
Coating pada tool sangat mempengaruhi burr yang terbentuk. Hal ini terlihat, bila membandingkan burr pada feed-rate yang sama. Slot yang dibuat dengan tool MEGA-T coated, membentuk burr lebih banyak dan berukuran lebih besar bila dibandingkan dengan slot yang dibuat menggunakan nACro coated.

Feed-rate juga mempengaruhi terbentuknya burr. Hal ini dilakukan dengan membandingkan pemilihan feed-rate terhadap jenis coating tool yang sama. Semakin tinggi feed-rate yang dipilih, semakin banyak dan semakin besar ukuran dari burr.

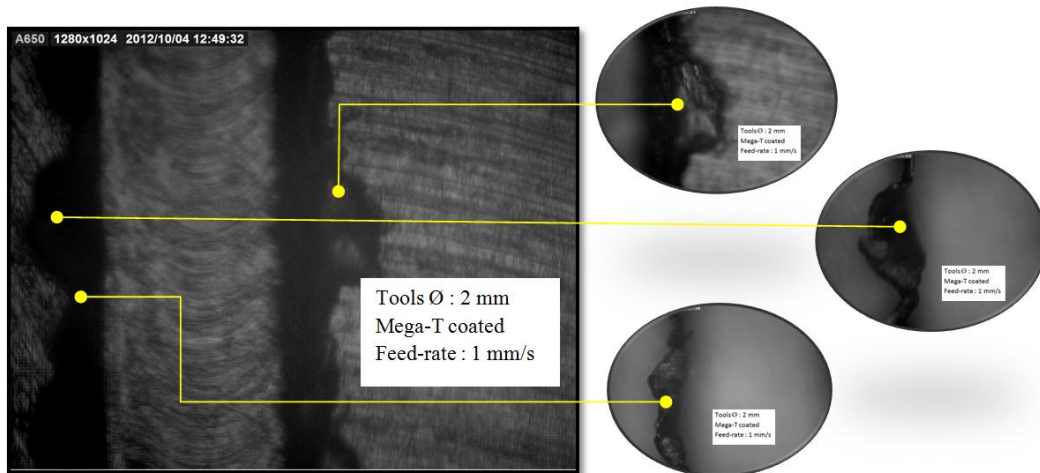
Dari gambar-gambar diatas, terlihat bahwa burr terbanyak terjadi pada slot yang dibuat dengan menggunakan tool MEGA-T coated pada Feed-rate 1 mm/s. Sedangkan minimum burr terjadi pada slot yang dibuat dengan menggunakan tool nACro coated pada feed-rate 0.05 mm/s.



Gambar 4.92. Burr yang terbentuk menggunakan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 0.05 mm/s



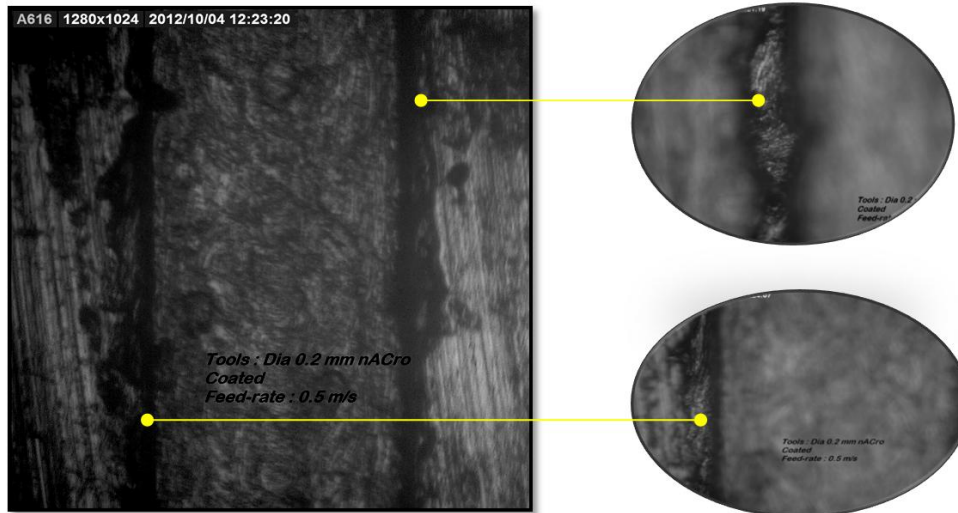
Gambar 4.93. Pembentukan burr dengan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 0.5 mm/s



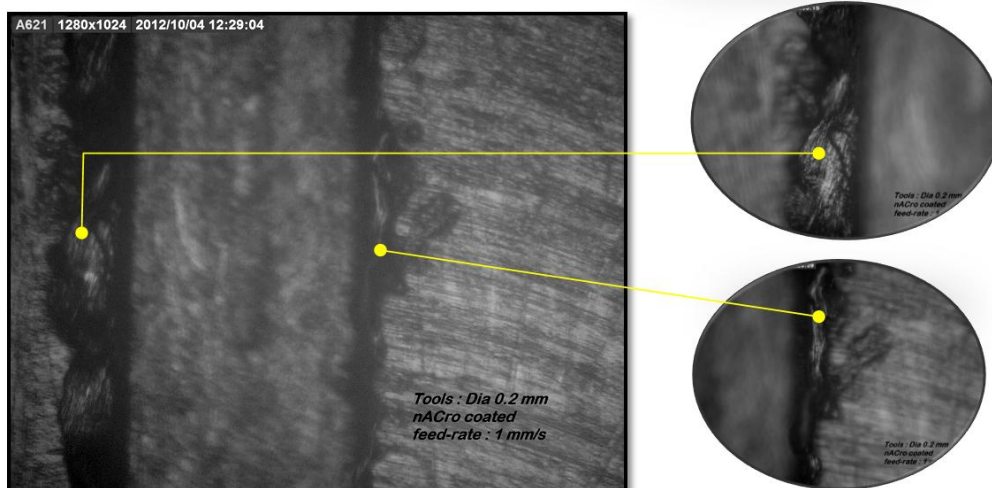
Gambar 4.94. Pembentukan burr dengan Tool MEGA-T coated dengan Feed-rate 1 mm/s



Gambar 4.95. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 0.05 mm/s



Gambar 4.96. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 0.5 mm/s



Gambar 4.97. Pembentukan burr dengan Tool nACro coated dengan Feed-rate 1 mm/s

Dari gambar-gambar di atas, terlihat bahwa burr terbanyak terbentuk pada slot yang dibuat dengan menggunakan tool MEGA-T coated pada Feed-rate 1 mm/s. Sedangkan minimum burr terbentuk, pada slot yang dibuat dengan menggunakan tool nACro coated pada feed-rate 0.05 mm/s.

BAB V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Dari riset ini dapat disimpulkan :

1. Pengembangan gerak pahat dengan sistem CAM komersial, Siemen UGNX dan PowerMill, menunjukkan bahwa keduanya dapat digunakan untuk membuat impeller dengan bentuk yang kompleks. Walaupun masing-masing memiliki strategi dan pengembangan lintasan pahat yang berbeda.
2. Pembuatan mini-impeller berukuran 54 mm dan 27 mm berhasil dilakukan pada material aluminium melalui empat proses utama, yaitu proses pembuatan shroud, proses roughing, proses finishing blade, dan proses finishing hub.
3. Pembuatan micro-impeller berdiameter 2 mm dengan blade lurus berhasil dilakukan dengan hanya menggunakan 3 sumbu dari 5 sumbu yang tersedia pada mesin 5-axis micro-milling agar mengefisienkan gerak pahat. Proses pemesinan melewati dua tahap yaitu roughing dan finishing.
4. Pembuatan inclined micro-impeller atau micro-impeller yang memiliki blade dengan kemiringan sebesar 8° dan berdiameter 2,5 mm berhasil dilakukan melalui tiga tahapan yaitu roughing, semi-finishing dan finishing.
5. Dikarenakan dimensi/ukuran tool yang sangat kecil, yaitu 0.1 mm dan 0.2 mm, maka parameter pemesinan yang dipilih harus sesuai dengan kemampuan tool. Feed-rate yang rendah dan depth per cut yang kecil seringkali mengakibatkan waktu pemesinan yang sangat lama. Namun, bila nilai feed-rate dan depth per cut diperbesar bahkan melampaui nilai yang direkomendasikan oleh produsen, maka tool akan cepat mengalami keausan atau patah.
6. Pemilihan feed-rate yang rendah ternyata dapat mengakibatkan terbentuknya geram yang kontinyu atau build-up edge pada tool. Geram yang kontinyu dapat melilit atau membungkus pahat, sedangkan build-up edge akan melapisi permukaan tool. Geram yang kontinyu dan build-up edge, keduanya dapat mengubah geometri tool sehingga benda kerja yang dihasilkan pun akan mengalami perubahan.
7. Pada proses pemesinan micro-milling, pembentukan burr ternyata sangat mempengaruhi benda kerja yang dihasilkan. Bila pada proses macro-milling konvensional, burr yang berukuran kecil tidak akan mengganggu kualitas benda kerja. Namun pada proses micro-milling, burr yang berukuran kecil pun akan relatif menjadi besar mengingat benda kerjanya yang berukuran sangat kecil.

5.2. Saran

Pemesinan pada operasi micro-milling membutuhkan ketelitian yang tinggi, mengingat dimensi tool dan benda kerja yang sangat kecil sehingga diperlukan alat ukur yang memiliki kemampuan dan resolusi dalam skala mikro atau bahkan nano. Pemutakhiran alat ukur akan memudahkan untuk melakukan riset terapan pada mesin 5-axis micro-milling.

Daftar Pustaka

- Atsushi Nakajima, Piljoong Kang, Nao Honda, Kousuke Hikichi, Masayoshi Esashi and Shuji Tanaka,” Fabrication and high-speed characterization of SU-8 shrouded two-dimensional microimpellers”, *Journal of Micromechanics and Microengineering* Volume 17 Number 9 (2007), doi:10.1088/0960-1317/17/9/S04.
- C.D. Torres, P.J.Heaney, A.V.Sumant, M.A.Hamilton, R.W.Carpick, F.E.Pfefferkorn,” Analyzing the performance of diamond-coated micro end mills”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 599–612.
- Cheng-Zhe Jin, Ik-Soo Kang, Jin-Hyo Park, Su-Hoon Jang and Jeong-Suk Kim,” The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel”, *Journal of Mechanical Science and Technology* 23 (2009) 2823~2829.
- David Burton, G. Scott Duncan, John C. Ziegert, Tony L. Schmitz,” High Frequency, Low Force Dynamometer for Micro-Milling Force Measurement”, *Proceeding of 19th American Society for Precision Engineering’s (ASP’s) annual & topical meeting*, 2004.
- Dirk Biermann & Alexander Baschin,” Influence of cutting edge geometry and cutting edge radius on the stability of micro-milling processes”, *Prod. Eng. Res. Devel.* (2009) 3:375–380 DOI 10.1007/s11740-009-0188-7.
- E. Brinksmeier, O. Riemer, J. Osmer, “Tool path generation for ultra-precision machining of free-form surfaces”, *Prod. Eng. Res. Devel.* (2008) 2:241–246
- Jan Peirs, Dominiek Reynaerts Filip Verplaetsen,” A microturbine for electric power generation”, *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 113, Issue 1, 15 June 2004, Pages 86-93
- J. Fleischer, M. Deuchert, C. Ruhs, C. Kuhlewein, G. Halvadjiysky, C. Schmidt, “Design and manufacturing of micro-milling tools”, *Microsyst Technol* (2008) 14:1771–1775 DOI 10.1007/s00542-008-0652-x.
- J.H. Lee, S.H. Kang, D.Y. Yang, “Novel forging technology of a magnesium alloy impeller with twisted blades of micro-thickness”, *Manufacturing Technology* 57 (2008) 261–264.
- Jun Martin B.G., Keith Bourne, Richard E. DeVor, Shiv G. Kapoor,” Estimation of effective error parameters in high-speed micro-endmilling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 1449–1454.
- K. Liu, T. Waumans, J. Peirs, D. Reynaerts,” HIGH PRECISION MANUFACTURING OF AN ULTRA MINIATURE CERAMIC GAS TURBINE IMPELLER”, *Proceedings of PowerMEMS 2008+ microEMS2008*, Sendai, Japan, November 9-12, (2008)
- K. Weinert, P. Kahnis, W. Koehler,” Investigation of Scaling Effects on Modelling and Simulation of Scaled Milling Processes”, *1st Colloquium Processscaling*, Bremen, 28./29.10.2003.
- Nao Honda, Satoshi Mori, Shuji Tanaka, Miyagi, Masayoshi Esashi,”Method for Fabricating Micromachine Componen of Resin”, *United State Patent Application Publication* Pub No.

US2009/0035706 A1, date February 5, 2009.

Onera The French Aerospace Lab, “Zoom in the Lab, Micro-turbines, maxi-difficulties”, <http://www.onera.fr/zoominthelab/29-microturbine-drone.php>, last update 29 Oktober 2007.

Stanislav S. Makhanov and Weerachai Anotaipai boon, “Advanced Numerical Methods to Optimize Cutting Operations of Five-Axis Milling Machines, Springer 2007.

Sangkyun Kang, James P. Johnston, Toshiyuki Arima, Minoru Matsunaga, Hideaki Tsuru, Friedrich B. Printz, “Microscale Radial-Flow Compressor Impeller Made of Silicon Nitride: Manufacturing and Performance”, ASME Journal Of Engineering For Gas Turbines And Power (2002) DOI: 10.1115/1.1739246 Paper No. 2003-GT-38933.

Son Seong-Min, Han-Seok Lim, In-Hwan Palk, Jung-Hwan Ahn,” A Study on Critical Depth of Cuts in Micro Grooving”, KSME International Journal, Vol. 17 No. 2, pp. 239--245, 2003.

W. Wang, S.H. Kweon, S.H. Yang, “A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool”, Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005) 702–708.

Yi Qin, “Micro-Manufacturing Engineering and Technology”, Elsevier, 2010.

Yoshimi Takeuchi,”Multi-Axis Control Ultraprecision Micromilling”, Key Engineering Materials Vols. 447-448 (2010) pp 801-805.

Ik Soo Kang, Jeong Suk Kim and Yong Wie Seo,” Cutting force model considering tool edge geometry for micro end milling process”, Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) 293-299

Elisa Vázquez, Ciro A. Rodríguez, Alex Elías-Zúñiga, Joaquim Ciurana,” An experimental analysis of process parameters to manufacture metallic micro-channels by micro-milling”, Int J Adv Manuf Technol 1 (2010) 51:945–955, DOI 10.1007/s00170-010-2685-4.