Dr Dr HENDRIKO S.T
Pengusul - Dosen

RIWAYAT PENELITIAN

1. Pengembangan Sistem Kontrol pada Reaktor Esterifikasi Biodiesel Berbahan Minyak Jelantah
   Tahun: 2023 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
2. Pengembangan Sistem Kontrol pada Reaktor Esterifikasi Biodiesel Berbahan Minyak Jelantah
   Tahun: 2022 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
3. Pengembangan Sistem Kontrol pada Reaktor Esterifikasi Biodiesel Berbahan Minyak Jelantah
   Tahun: 2021 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi
4. Pengembangan Kinematika Robot Paralel 5 Derajat Kebebasan Menggunakan Metode Analytical Invers Kinematics Simulation
   Tahun: 2020 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Dasar
5. Pengembangan Metode Analytical Boundary Simulation untuk Menghitung Geometri Tatal pada Permesinan Milling Lima Sumbu Menggunakan Pahat Solid
   Tahun: 2019 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi
6. Pengembangan Kinematika Robot Paralel 5 Derajat Kebebasan Menggunakan Metode Analytical Invers Kinematics Simulation
   Tahun: 2019 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Dasar
7. Pengembangan komposit poliester berpenguat limbah logam mesin bubut dan styrofoam
   Tahun: 2018 | **Peran:** Ketua TPM | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi
8. Pengembangan komposit poliester berpenguat limbah logam mesin bubut dan styrofoam
   Tahun: 2017 | **Peran:** Ketua TPM | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi
9. Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Tinggi Scallop Pada Permesinan Milling Multi Sumbu
   Tahun: 2017 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
   Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi
10. Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Kinematika Robot Paralel dengan 6 Derajat Kebebasan
    Tahun: 2017 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
    Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi
11. Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Tinggi Scallop Pada Permesinan Milling Multi Sumbu
    Tahun: 2016 | **Peran:** Ketua Pengusul | **Sumber Dana:** Ristekdikti
    Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi

SURAT PERJANJIAN PENUGASAN PELAKSANAAN
PROGRAM HIBAH PENELITIAN FUNDAMENTAL
TAHUN ANGGARAN 2017
Nomor : 0036/KONTRAK-BP2M/PCR/2017

Pada hari ini **Rabu** tanggal **Tujuh Belas** bulan **Mei** tahun **Dua Ribu Tujuh Belas**, kami yang bertandatangan dibawah ini :

1. Yusmar Palapa Wijaya, S.Si., M.T.. : Kepala BP2M Politeknik Caltex Riau, dalam hal ini bertindak untuk dan atas nama Politeknik Caltex Riau yang berkedudukan di Pekanbaru, untuk selanjutnya disebut **PIHAK PERTAMA**.

2. Dr. Hendriko, S.T., M.Eng. : Dosen Politeknik Caltex Riau dalam hal ini bertindak sebagai pengusul dan Ketua Pelaksana PENELITIAN FUNDAMENTAL Tahun Anggaran 2017 untuk selanjutnya disebut **PIHAK KEDUA**.

Perjanjian penugasan ini berdasarkan pada Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian dan Pengabdian Masyarakat bagi Dosen Perguruan Tinggi Swasta di Lingkungan Kopertis Wilayah X Tahun Anggaran 2017 Nomor : 089/KONTRAK-PENELITIAN/K10/KM/2017 Tgl. 10 April 2017.

PIHAK PERTAMA dan **PIHAK KEDUA**, secara bersama-sama bersepakat mengikatkan diri dalam suatu Perjanjian Penugasan Pelaksanaan PENELITIAN FUNDAMENTAL Tahun 2017 dengan ketentuan dan syarat-syarat sebagaimana diatur dalam pasal-pasal sebagai berikut:

PASAL 1

Perjanjian penugasan ini berdasarkan kepada:
1. Undang-undang Republik Indonesia No 17 tahun 2003 tentang Keuangan Negara;
2. Undang-undang Republik Indonesia No 20 tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Tinggi;
3. Undang-undang Republik Indonesia No 01 tahun 2004 tentang Perbendaharaan Negara;
4. Undang-undang Republik Indonesia No 15 tahun 2004 tentang Pemeriksaan dan Tanggung Jawab Keuangan Negara;
5. Undang-undang Republik Indonesia No 12 tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi;
6. Peraturan Mentri Keuangan Nomor 106/PMK.2/2016 tentang Standar Biaya Keluaran Tahun 2017 ;
7. Peraturan Menteri Riset, Teknologi Pendidikan Tinggi Republik Indonesia No. 69 Tahun 2016 Tentang Tata Cara Pembentukan Komite Penilaian dan/atau Reviewer Penelitian;
8. Keputusan Direktut Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 28/E/KPT/2017 tentang Penerima Pendanaan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun Anggaran 2017;
9. Keputusan Kuasa Pengguna Anggaran Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Nomor 02/E.1/KPT/2017 Tanggal 14 Januari 2017;
10. Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA) Nomor DIPA-042.06.1.401516/2017 Tanggal 7 Desember 2016.

PASAL 2

(1) **PIHAK PERTAMA** memberi tugas kepada **PIHAK KEDUA**, dan **PIHAK KEDUA** menerima tugas tersebut sebagai penanggungjawab pelaksanaan PENELITIAN FUNDAMENTAL tahun 2017 dengan judul **"PENGEMBANGAN METODE ANALITIS UNTUK MENGHITUNG TINGGI SCALLOP PADA PERMESINAN MILLING MULTI SUMBU"**.

(2) **PIHAK KEDUA** bertanggung jawab penuh atas pelaksanaan Administrasi dan keuangan atas pekerjaan/kegiatan sebagaimana dimaksud pada ayat 1 dan berkewajiban menyerahkan semua bukti-bukti pengeluaran serta dokumen pelaksanaan lainnya dalam bentuk laporan yang tersusun secara sistematis kepada **PIHAK PERTAMA**.

(3) Pelaksanaan Penugasan PENELITIAN FUNDAMENTAL tahun 2017 sebagaimana dimaksud Judul penelitian diatas didanai dari Anggaran (DIPA) No SP DIPA-042.06.1.401516/2017 tanggal 7 Desember 2016.

PASAL 3

(1) **PIHAK PERTAMA** menyerahkan dana penelitian sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 sebesar Rp93.960.000,- **(Sembilan Puluh Tiga Juta Sembilan Ratus Enam Puluh Rupiah)** yang berasal dari Anggaran (DIPA) No. SP DIPA-042.06.1.401516/2017 tanggal 7 Desember 2016.

(2) Dana Penugasan Pelaksanaan Penelitian sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dibayarkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** secara bertahap dengan ketentuan sebagai berikut:

a. Pembayaran Tahap Pertama sebesar 70% dari total bantuan dana kegiatan yaitu 70% X 93.960.000 ,- = **Rp.** 65.772.000 ,- **(Enam Puluh Lima Juta Tujuh Ratus Tujuh Puluh Dua Ribu Rupiah)**.

b. Pembayaran Tahap Kedua/Terakhir sebesar 30% dari total dana kegiatan yaitu 30% X 93.960.000 ,- = Rp. 28.188.000 **(Dua Puluh Delapan Juta Seratus Delapan Puluh Delapn Ribu)** dibayarkan setelah **PIHAK KEDUA** mengunggah ke laman SIMLITABMAS **selambat-lambatnya tanggal 15 September 2017** dokumen sebagai berikut:
    a) Catata harian pelaksanaan penelitian
    b) Laporan pelaksanaan penelitian

c. **PIHAK KEDUA** bertanggung jawab mutlak dalam pembelanjaan dana tersebut pada ayat (1) sesuai dengan proposal kegiatan yang telah disetujui dan berkewajiban untuk menyerahkan kepada **PIHAK PERTAMA** semua laporan dan laporan penggunaan anggaran serta bukti-bukti pengeluaran sesuai dengan jumlah dana yang diberikan oleh **PIHAK PERTAMA**.

PASAL 4

(1) **PIHAK KEDUA** berkewajiban menindaklanjuti dan mengupayakan hasil PENELITIAN FUNDAMENTAL berupa hak kekayaan intelektual dan atau publikasi ilmiah sesuai dengan liuran yang dijanjikan pada Proposal.

(2) Perolehan hasil sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dimanfaatkan sebesar-besarnya untuk pelaksanaan Tri Dharma Perguruan Tinggi.

(3) **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk melaporkan perkembangan perolehan hasil sebagaimana dimaksud pada ayat (1) kepada **PIHAK PERTAMA** selambat-lambatnya pada tanggal 15 September 2017.

PASAL 5

(1) **PIHAK KEDUA** harus menyampaikan surat pernyataan telah menyelesaikan seluruh pekerjaan yang dibuktikan dengan mengunggah pada laman *website* SIMLITABMAS.

a. Catatan harian komprehensif pelaksanaan penelitian pada tanggal 30 Oktober 2017
b. Laporan akhir capaian hasil, poster artikel ilmiah dan profile, pada tanggal 31 Oktober 2017 (bagi penelitian tahun terakhir)

(2) Apabila sampai dengan batas waktu yang telah ditetapkan untuk melakasanakan kontrak penelitian telah berakhir, **PIHAK KEDUA** belum menyelesaikan tugasnya dan atau terlambat mengirimkan laporan kemajuan dan atau terkambat mengirimkan laporan akhir, maka PIHAK KEDUA dikenakan sanksi administrative berupa penghentian pembayaran dan tidak dapat mengajukan proposal penelitian dalam kurun waktu dua tahun berturut-turut.

(3) Peneliti yang tidak hadir dalam kegiatan pemonitoran dan evaluasi tanpa pemberitahuan sebelumnya kepada kepada Direktur Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, maka pelaksanaan penelitian tidak berhak menerima sisa dana tahap kedua sebesar 30%

(4) Apabila dalam penilaian luaran terdapat luaran tambahan yang tidak tercapai, maka dana tambahan yang sudah diterima harus disetorkan kembali ke kas Negara.

PASAL 6

(1) Laporan hasil penelitian sebagaimana tersebut pada pasal 5 ayat (1) tertulis dalam format font Times Romans ukuran 12 spasi 1,5 kertas A4 bagian bawah sampul cover ditulis:

Dibiayai oleh:
Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat
Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi
Sesuai Kontrak Penelitian Tahun Anggaran 2017

(2) Softcopy laporan hasil program penelitian sebagaimana tersebut pada ayat (1) harus diunggah ke laman SIMLITABMAS sedangkan hardcopy di serahkan ke pada **PIHAK PERTAMA**.

PASAL 7

(1) Apabila PIHAK KEDUA berhenti dari jabatan, sebelum kontrak ini selesai, maka pihak kedua wajib menyerah terimakan tanggung jawab kepada pejabat baru yang menggantikannya, dibuktikan dengan adanya Berita Acara Serah Terima (BAST) yang ditandatangani oleh kedua belah pihak.

(2) Apabila setiap ketua pelaksana sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 ayat (4) tidak dapat menyelesaikan pelaksanaan penelitian ini, maka PIHAK KEDUA wajib menunjuk pengganti Ketua Pelaksana yang merupakan salah satu anggota tim setelah mendapat persetujuan tertulis dari Direktur Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan.

(3) Apabila setiap ketua Peneliti mengundurkan diri sebagai ketua, harus diganti dengan anggota tim dengan syarat ketentuan yang ada, jika tidak ada dana dikembalikan ke kas Negara.

PASAL 8

Hal-hal atau segala sesuatu yang berkenaan dengan kewajiban pajak berupa PPN dan/atau PPh menjadi tanggungjawab PIHAK KEDUA dan harus dibayarkan ke kantor pelayanan pajak setempat sebagai berikut:

1. Pembelian barang dan jasa dikenai PPN sebesar 10% dan PPh sebesar 1,5%
2. Belanja honorarium yang dikenakan PPh Pasal 21 dengan ketentuan :
   a. 5% (lima persen) bagi yag memiliki NPWP untuk Golongan III, serta 6% (enam persen) bagi tidak memiliki NPWP
   b. Untuk Golongan IV sebesar 15% (lima belas persen).
3. Pajak-pajak lain sesuai ketentuan yang berlaku.

PASAL 9

(1) Hak kekayaan intelektual yang dihasilkan dari pelaksanaan Penelitian diatur dan dikelola sesuai dengan peraturan dan perundang – undangan yang berlaku.

(2) Setiap publikasi, makalah dan atau ekspos dalam bentuk apapun yang berkaitan dengan hasil penelitian wajib mencantumkan Direktur Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan sebagai pemberi dana.

(3) Hasil Penelitian berupa peralatan dan/atau alat yang dibeli dari kegiatan ini adalah milik Negara yang dapat dihibahkan kepada institusi/lembaga melalui Berita Acara Serah Terima (BAST) .

PASAL 10

(1) Apabila dikemudian hari judul PENELITIAN FUNDAMENTAL sebagaimana dimaksud pada Pasal 2 ditemukan adanya duplikasi dengan PENELITIAN FUNDAMENTAL lain dan atau ditemukan adanya ketidak jujuran/itikad kurang baik yang tidak sesuai dengan kaidah ilmiah, maka kegiatan tersebut dinyatakan batal dan PIHAK KEDUA wajib mengembalikan dana Tahun 2017 yang telah diterima kepada PIHAK PERTAMA yang selanjutnya disetor ke Kas Negara.

PASAL 11

(1) **PARA PIHAK** dibebaskan dari tanggung jawab atas keterlambatan atau kegagalan atau dalam memenuhi kewajiban yang dimaksud dalam kontrak Penelitian disebabkan atau diakibatkan oleh peristiwa atau kejadian diluar kekuasaan **PARA PIHAK** yang dapat digolongkan sebagai keadaan memaksa *(force majeure)*.

(2) Peristiwa atau kejadian yang dapat digolongkan keadaan memaksa *(force majeure)* dalam Kontrak Program Pengabdian Masyarakat ini adalah bencana alam, wabah penyakit, kebakaran, perang, blokade, peledakan, sabotase, revolusi, pemberontakan, hura-hara, serta adanya tindakan pemerintah dalam bidang ekonomi dan moneter yang secara nyata berpengaruh terhadap pelaksanaan kontrak ini.

(3) Apabila terjadi keadaan memaksa *(force majeure)* maka pihak yang mengalami wajib memberitahukan kepada pihak lainnya secara tertulis, selambat-lambatnya dalam waktu 7 (tujuh) hari kerja sejak terjadinya keadaan memaksa *(force Majeure)*, disertai dengan bukti-bukti yang sah dari pihak yang berwajib, dan **Para Pihak** dengan itikad baik akan segera membicarakan penyelesaiannya.

PASAL 12

(1) Apabila terjadi perselisihan antara PIHAK PERTAMA dan PIHAK KEDUA dalam pelaksanaan perjanjian ini akan dilakukan penyelesaian secara musyawarah dan mufakat, dan apabila tidak tercapai penyelesaian secara musyawarah dan mufakat maka penyelesaian dilakukan melalui proses hukum.

(2) Hal-hal yang belum diatur dalam perjanjian ini diatur kemudian oleh kedua belah pihak.

PASAL 13

Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan PENELITIAN FUNDAMENTAL ini dibuat rangkap 2 (dua) dan bermaterai cukup sesuai dengan ketentuan yang berlaku, dan biaya materai dibebankan kepada **PIHAK KEDUA.**

PIHAK PERTAMA	PIHAK KEDUA
METERAI TEMPEL 2685BACF208315107 6000 DJP	
Yusmar Palapa Wijava, S.Si., M.T	**Dr. Hendriko, S.T., M.Eng.**
NIP. 027608	**NIP. 007606**

432/Teknik Produksi

LAPORAN AKHIR TAHUN

PENELITIAN FUNDAMENTAL

Politeknik Caltex Riau

Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Tinggi Scallop Pada Permesinan Milling Multi Sumbu

Tahun ke-2 dari rencana 2 tahun

Ketua : Dr. Hendriko, ST, M.Eng. (1009017601)

Anggota : Amnur Akhyan, S.S.T, M.T. (1025017803)

Dibiayai oleh:

Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat

Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan

Kementrian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi

Sesuai Kontrak Penelitian Tahun Anggaran 2017

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : *Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Tinggi Scallop Pada Permesinan Milling Multi Sumbu*

Pelaksana

Nama Lengkap	: Dr. Hendriko, ST, M.Eng.
NIDN	: 1009017601
Jabatan Fungsional	: Lektor
Program Studi	: Teknik Mekatronika
No. HP	: 0811690050
Alamat surel (e-mail)	: hendriko@pcr.ac.id

Anggota (1)

Nama Lengkap	: Amnur Akhyan, S.S.T, M.T
NIDN	: 1025017803
Perguruan Tinggi	: Politeknik Caltex Riau

Tahun Pelaksanaan	: 2017
Biaya Tahun Berjalan	: Rp 93.960.000,-
Biaya Keseluruhan	: Rp 144.960.000,-

Pekanbaru, 16 Oktober 2017

Mengetahui

Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat

UPPM

Politeknik Caltex Riau

Established 2001

Yusmar Palapa Wijaya, S. Si., M.T.

NIP. 027608

Ketua

Dr. Hendriko, ST, M.Eng.

NIP. 007606

RINGKASAN

Proses permesinan milling multi sumbu memberikan banyak manfaat dibandingkan dengan proses pada permesinan tiga sumbu dalam hal memproduksi komponen dengan bentuk yang rumit. Hal ini disebabkan karena pada mesin milling multi sumbu terdapat tambahan sumbu yang membuat pahat dapat melakukan gerakan rotasi selain bergerak pada sumbu x, y, dan z. Namun karena pergerakan pahat yang sangat fleksibel, hal ini mengakibatkan proses simulasi permesinan menjadi lebih rumit.

Pada penelitian ini diusulkan sebuah metode yang dapat digunakan untuk menghitung tinggi scallop dari hasil proses permesinan milling multi sumbu. Tinggi Scallop merupakan salah satu indikator yang menentukan kualitas permukaan hasil permesinan. Dalam penelitian ini metode yang dikembangkan adalah metode analitis. Pemilihan metode ini adalah dengan mempertimbangkan bahwa metode analitis memiliki keunggulan dalam hal waktu komputasin yang pendek. Pada penelitian ini algoritma matematika yang digunakan merupakan pengembangan dari metode *Analytical Boundary Simulation* (ABS) yang sebelumnya digunakan untuk menghitung ukuran dan bentuk geometri tatal (chip geometry).

Dalam penelitian dua tahun telah berhasil disusun algoritma matematika untuk menghitung tinggi scallop lintasan (*path scallop*) dan scallop pemakanan (*feed scallop*). Algortitma lintasan scallop yang dibangun adalah untuk proses permesinan dengan menggunakan pahat datar (*flat end-mill*). Sedangkan untuk scallop pemakanan algoritma yang disusun adalah untuk pahat toroidal. Beberapa variabel seperti sudut helikal dan sudut inklinasi diperhitungkan dalam algoritma yang dikembangkan. Algoritma matematika yang disusun kemudian digunakan untuk mengembangkan program simulasi. Program simulasi tersebut dapat digunakan untuk menghitung tinggi scallop dari suatu proses permesinan dan sekaligus menampilkan bentuk scallop pada permukaan benda kerja.

Proses pengujian terhadap kemampuan metode yang diusulkan dalam menghitung tinggi scallop telah dilakukan. Dan verifikasi untuk membuktikan akurasi metode juga sudah dilakukan. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan tinggi scallop yang dihitung menggunakan ABS dan tinggi scallop yang diukur dengan menggunakan software CAD/CAM Siemen-NX. Hasilnya menujukan bahwa perbedaan diantara keduanya sangat kecil atau kurang dari 6%. Ini membuktikan bahwa metode analitis yang diusulkan sangat akurat.

Kata kunci : Scallop, Mesin Milling Multi Sumbu, Analytical Boundary Simulation

PRAKATA

Syukur Alhamdulilah kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkah dan karunianya sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Akhir Penelitian Fundamental tahun 2017 yang berjudul: "***Pengembangan Metode Analitis Untuk Menghitung Tinggi Scallop Pada Permesinan Milling Multi Sumbu*.**

Keberhasilan kami menyelesaikan penelitian tahun pertama ini adalah berkat bantuan dari berbagai pihak, baik bantuan yang diberikan pada saat persiapan, masa penelitian, pembahasan maupun pada saat penyusunan Laporan Akhir. Oleh karena itu pada kesempatan ini kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besar nya kepada:

1. Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi serta Kopertis Wilayah X yang telah memberikan bantuan dana untuk kegiatan penelitian ini.
2. Pimpinan Politeknik Caltex Riau, Direktur dan para Pembantu Direktur yang telah memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada kami untuk mengembangkan diri dalam kegiatan Tri darma Perguruan Tinggi khususnya dalam kegiatan Penelitian.
3. Kepala Unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Bapak Yusmar Palapa, SPd. M.T. dan stafnya yang telah memberikan banyak dukungan teknis, fasilitas administrasi guna kelancaran penelitian.
4. Para Kolega di Teknik Mekatronika yang telah memberikan dorongan, semangat dan sumbang saran dalam pelaksanaan penelitian ini.
5. Serta semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu yang telah memberi bantuan, arahan serta dorongan kepada kami dalam menyelesaikan penelitian tahun pertama ini.

Akhirnya kami berharap agar kiranya hasil dari penelitian yang kami lakukan dalam tahun 2017 ini dapat bermanfaat bagi kami selaku peneliti, dan tentunya bagi kemajuan bangsa Indonesia.

Pekanbaru, Oktober 2017

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN **i**

RINGKASAN **ii**

PRAKATA **iii**

DAFTAR ISI **iv**

BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Keutamaan Penelitian 2

BAB II TINJAUAN PUSTAKA **3**
2.1 *State of the Art* 3
2.2 Peta Jalan Penelitian 5

BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN **7**

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN **8**
3.1 Tahapan Penelitan 8
3.2 Luaran dan Indikator Capaian 9

BAB V HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI
5.1 Tinggi Scallop Lintasan Pahat Datar 10
5.2 Scallop Pemakanan Dengan Pahat Toroidal 15
5.3 Scallop Lintasan Dengan Pahat Toroidal 20
5.4 Pengaruh sudut helikal Terhadap Orientasi Pahat dan Kurva Tersapu 25
5.5 Luaran Yang Dicapai 30

BAB VI RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA **32**

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN **33**

Daftar Pustaka **34**

Lampiran (Bukti Luaran Yang Didapatkan) 36

BAB I.

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Proses permesinan berkembang sangat pesat sejalan dengan perkembangan industri otomotif dan dirgantara. Banyak produk seperti komponen-komponen otomotif yang dirancang dengan bentuk permukaan bebas (*free-form surfaces*). Saat ini komponen-komponen (*part*) tersebut biasanya diproduksi dengan menggunakan mesin milling lima sumbu. Mesin milling lima sumbu menawarkan efisiensi proses permesinan yang lebih baik dibandingkan dengan mesin milling tiga sumbu dalam hal memproduksi komponen dengan permukaan yang kompleks. Pada mesin milling lima sumbu, orientasi pahat relatif terhadap benda kerja dapat diatur dengan mudah dimana pahat dapat bergerak mengikuti kontur permukaan komponen. Hal ini dapat dilakukan karena adanya tambahan dua derajat kebebasan pada mesin milling lima sumbu. Namun demikian, selain memberikan fleksibilitas, tambahan dua derajat kebebasan ini juga meningkatkan kompleksitas proses permesinan.

Permesinan komponen dengan permukaan bebas biasanya dilakukan dengan jumlah perpindahan pahat yang sangat banyak. Hal ini mengakibatkan waktu permesinan menjadi lebih panjang dan pada akhirnya biaya permesinan menjadi sangat mahal. Dengan mempertimbangkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk proses penyelesaian (*finishing*) dan penggosokan (*polishing*) dapat menyerap sebanyak 75% dari waktu permesinan total [**1**], maka proses pememilihan dan pengaturan parameter pemotongan dan strategi permesinan yang digunakan untuk meningkatkan kualitas produk menjadi sangat penting.

Secara umum terdapat tiga parameter yang biasanya digunakan untuk mengatur akurasi dari permukaan termesin (*machined surface*): 1) toleransi permesinan; 2) tinggi scallop (*scallop height*); dan 3) kekasaran permukaan (*surface roughness*). Pada mesin milling lima sumbu, tinggi scallop menjadi komponen yang sangat penting dalam mengukur kekasaran permukaan. Tinggi scallop diukur dari permukaan komponen yang dirancang ke puncak material sisa hasil pemotongan. Ukuran tinggi scallop dipengaruhi oleh empat faktor: 1) geometri pahat potong; 2) orientasi pahat; 3) geometri permukaan komponen; dan 4) jarak antara lintasan pahat (*tool path*) yang berdekatan atau disebut *step over*. Untuk memperoleh kualitas permukaan yang diharapkan, tinggi scallop harus dikontrol dengan baik. Namun karena kompleksitas permukaan komponen dan orientasi pahat menyebabkan tinggi scallop sulit dihitung. Metode untuk menentukan tinggi scallop pada proses permesinan khususnya untuk permesinan bentuk permukaan bebas masih menjadi tantangan.

Banyak studi yang telah dilakukan untuk menghitung tinggi scallop. Sebagian besar studi dilakukan untuk proses permesinan milling tiga sumbu dan hanya sedikit yang telah melakukan

untuk mesin milling lima sumbu. Terdapat beberapa kelemahan dari pendekatan analitis yang dilakukan dalam menghitung tinggi scallop pada proses permesinan milling lima sumbu. Penjelasan secara rinci tentang kelemahan-kelemahan tersebut ditampilkan pada bagian *state of the art*.

Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikembangkan sebuah metode analitis untuk menghitung tinggi scallop pada proses permesinan milling lima sumbu. Algoritma matematika yang dikembangkan selanjutnya digunakan untuk membuat program simulasi sehingga data tinggi scallop dapat dihasilkan dengan cepat dan bentuk scallop dapat ditampilkan.

1.2. Keutamaan Penelitian

Untuk mendukung pengembangan permesinan virtual, data geometri yang akurat menjadi sangat penting khususnya dalam menentukan kekasaran permukaan hasil dari proses permesinan [2]. Banyak studi dalam bidang simulasi geometri dengan model solid yang dilakukan seperti *constructive solid geometry* (CSG) [3, 4] dan *boundary representations* (B-Rep) [5, 6]. Studi lain [7-9] menggunakan metode *Z-map* dimana benda kerja direpresentasikan dengan sekumpulan vektor yang disebar di seluruh permukaan benda kerja. Model solid menghasilkan informasi yang akurat namun memiliki kelemahan dalam hal waktu komputasi (*computational time*) yang sangat panjang. Sementara itu waktu komputasi metode *Z-map* lebih cepat dibanding model solid. Meski demikian, waktu komputasi metode *Z-map* akan meningkat drastis ketika akurasi dan presisi dtingkatkan.

Untuk mengatasi masalah terkait waktu komputasi yang panjang maka beberapa peneliti [10-13] mengembangkan metode analitis dalam melakukan simulasi geometri untuk mendukung analisa proses permesinan. Kiswanto et al. [11] dan Hendriko et al. [12] mengembangkan metode analitis yang disebut *Analytical Boundary Simulation* (ABS) untuk menentukan geometri tatal pada mesin milling lima sumbu. Hasilnya menunjukan bahwa metode yang diusulkan akurat dan lebih cepat dibandingkan dengan metode Z-map. Gupta et al. [13] menyebutkan bahwa metode analitis jauh lebih cepat dan lebih akurat dibandingkan metode diskret.

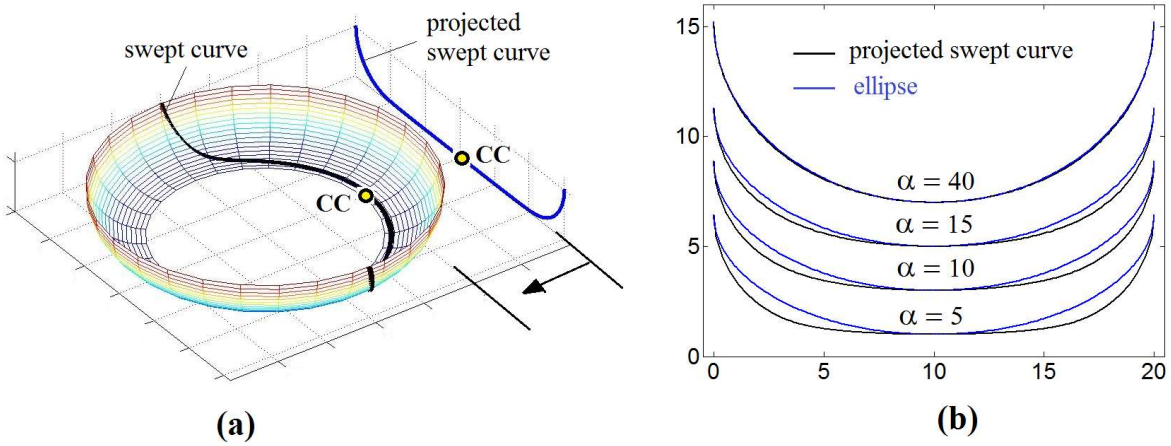
Oleh karena itu keutamaan dari penelitian ini adalah: selain untuk menyelesaikan permasalahan yang saat ini muncul dalam metode menentukan tinggi scallop sebagaimana yang sudah dijelaskan pada latar belakang dan penjelasan lebih rinci pada *state of the art*, metode yang akan dikembangkan juga memiliki keunggulan dalam hal waktu komputasi yang singkat karena metode ini berbasis analitis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of the Art*

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menghitung tinggi scallop pada permesinan komponen permukaan bebas. Beberapa peneliti [14-17] melakukan studi terhadap tingkat keefektifan pahat datar (*flat-end mill*) pada permesinan permukaan yang dilengkungkan. Dari studi tersebut, tinggi scallop dari proses permesinan yang menggunakan pahat datar yang dimiringkan didefinisikan secara analitis. Hasilnya menunjukan bahwa pahat datar menghasilkan tinggi scallop yang dapat bersaing dengan tinggi scallop yang dihasilkan dari proses permesinan menggunakan pahat bola (*ball-end mill*). Peneliti lain [18-22] mengembangkan model untuk menghitung tinggi scallop pada pahat bola agar diperoleh lintasan pahat yang optimal. Ozturk et.al [23] menginvestigasi pengaruh sudut inklinasi (*inclination angle*) dan sudut miring (*tilt angle*) terhadap tinggi scallop. Sedangkan studi lainnya [17,24] memberikan perhatian pada isu terkait tinggi scallop menggunakan pahat toroidal pada permesinan milling tiga sumbu dan Wang & Yu [25] konsentrasi menggunakan pahat toroidal pada mesin milling lima sumbu. Semua penelitian tersebut menggunakan asumsi yang sederhana bahwa kurvatur permukaan benda benda kerja konstan dan geometri pahat diaproksimasikan dengan dua geometri primitif yang umum, yaitu lingkaran dan elips.

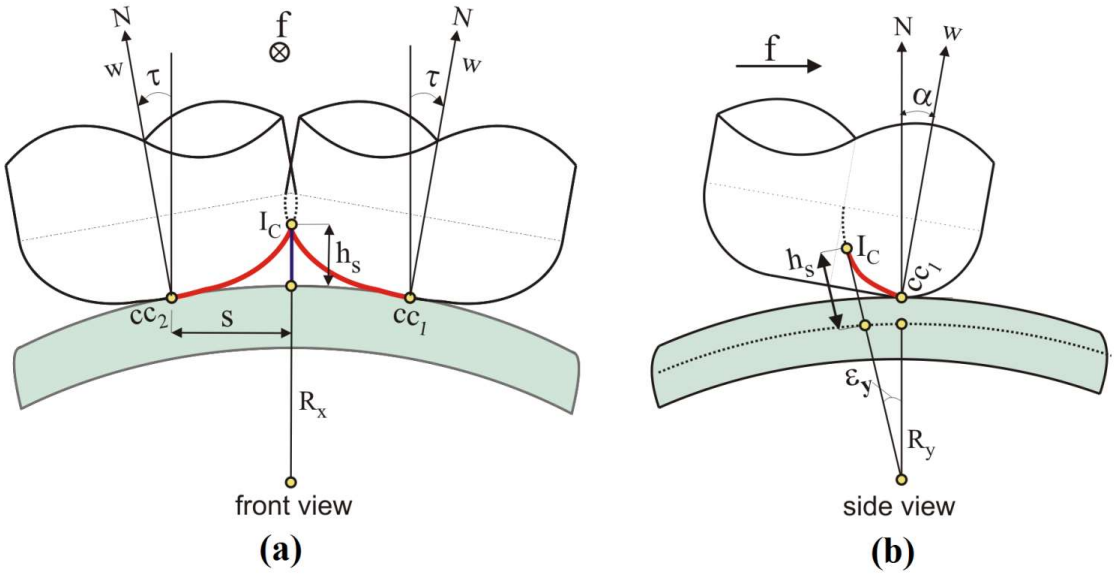


Gambar 2.1 a) kurva tersapu dan kurva tersapu yang diproyeksikan dalam 2D, b) perbandingan kurva elips dan kurva tersapu untuk beberapa sudut inklinasi.

Senatore et al.[22] merepresentasikan permukaan tersapu pahat (*tool swept envelope*) dengan cara menghitung radius efektif pahat toroidal. Radius efektif pahat dihitung sebagai pengaruh adanya sudut inklinasi. Kemudian tinggi scallop terhadap radius permukaan komponen dapat dihitung dan akhirnya *step over* dapat ditentukan. Penelitian lain [14-21, 24,25]

merepresentasikan pahat datar dan pahat bola yang dimiringkan karena adanya *tilt angle* dengan sebuah elips. Secara matematika, proyeksi 2D dari bentuk kurva tersapu (*swept curves*) dari pahat datar dan pahat bola yang dimiringkan dapat ditentukan secara tepat dengan menggunakan persamaan parametrik untuk sebuah elips. Kondisi berbeda terjadi dengan pahat toroidal. Secara geometri, pahat toroidal lebih kompleks dibandingkan dengan pahat datar dan pahat bola dimana toroidal cutter dibentuk oleh dua permukaan, yaitu: permukaan silinder dan permukaan toroidal. Hal ini mengakibatkan untuk menghitung kurva tersapu ketika pahat menggunakan sudut inklinasi menjadi lebih rumit.

Penelitian yang diusulkan pada proposal ini dimaksudkan untuk memperbaiki kelemahan yang ditemukan pada metode analitis untuk menghitung tinggi scallop yang sudah dipublikasikan. Ada dua kelemahan yang ditemukan, pertama adalah kelemahan dalam mengaproksimasi kurva tersapu. Contoh kurva tersapu dari pahat toroidal ketika terdapat sudut inklinasi dan bentuk kurva tersapu yang diproyeksikan dalam gambar 2D ditunjukan pada Gambar 2.1a. Gambar 2.1b membandingkan bentuk kurva proyeksi dengan bentuk elips untuk berbagai sudut inklinasi. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa bentuk kurva proyeksi sangat dinamis sehingga antara kurva proyeksi dan elips tidak berhimpit secara sempurna. Ini artinya bahwa kurva proyeksi tidak dapat direpresentasikan atau diaproksimasi dengan elips maupun lingkaran, khususnya ketika sudut inklinasi kecil.



Gambar 2.2 Titik persinggunan kurva tersapu antara dua lintasa pahat, a) tampak depan, b) tampak samping

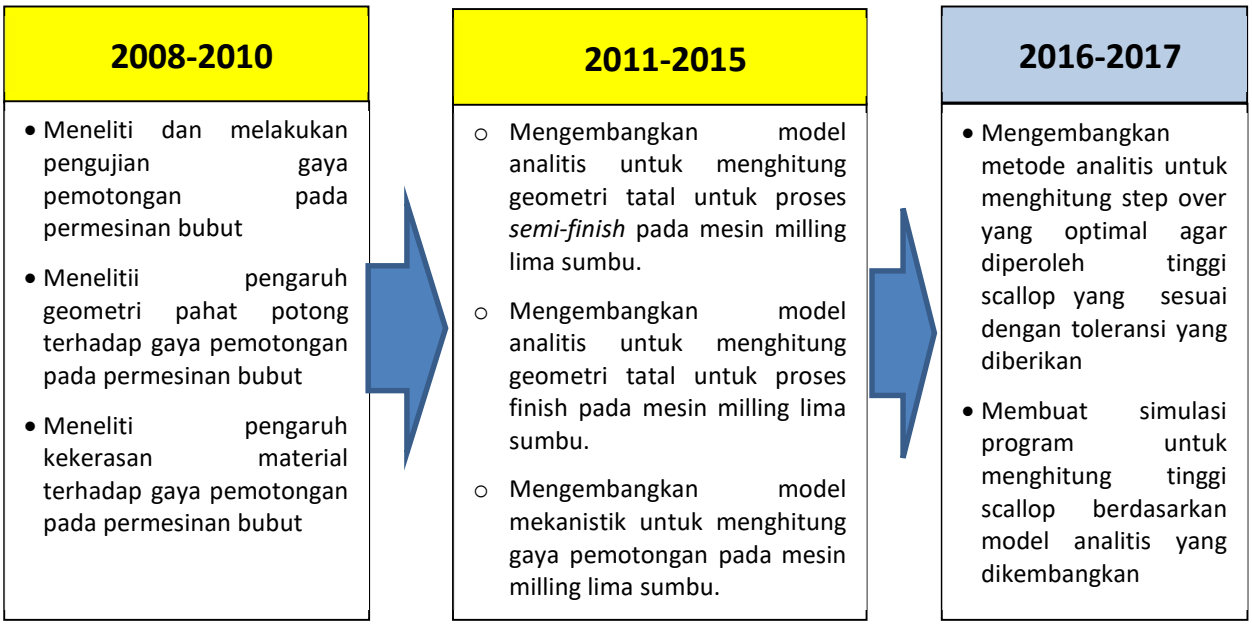
Kelemahan kedua terletak pada metode untuk mengukur tinggi scallop. Karena kurva tersapu diproyeksikan menjadi 2D maka tinggi scallop diukur secara veritikal dari titik potong dari dua pahat potong dari dua lintasan pahat yang berdekatan (I_C) ke permukaan komponen sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 2.2a [26-28]. Hal ini mengakibatkan bentuk kurvatur dari sisi lain diabaikan. Dengan kata lain bahwa metode yang ada saat ini sangat

menyederhanakan algoritma menghitung tinggi scallop untuk sebuah permukaan bentuk bebas dengan sebuah permukaan yang sederhana. Gambar 2b menunjukan sudut pandang dari titik potong. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa titik potong tidak sejajar dengan titik kontak pahat (*cutter contact point*) namun berada di belakang titik kontak pahat. Karena tinggi scallop diukur tegak lurus dari permukaan komponen maka metode kurva proyeksi yang ada saat ini cenderung menghasilkan eror ketika melakukan permesinan permukaan bebas.

Oleh karena itu penelitian ini dimaksudkan untuk mengembangkan metode analitis untuk mencari tinggi scallop dari pahat toroidal pada mesin milling lima sumbu. Metode analitis yang dikembangkan diharapkan dapat menjawab kelemahan metode yang ada saat ini sebagaimana yang sudah dijelaskan di atas.

2.2 Peta Jalan Penelitian

Metode untuk menentukan parameter permesinan yang optimal berdasarkan perhitungan geometri tatal (*chip*) dan gaya pemotongan telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya [11, 12, 29]. Pada penelitian ini parameter pemotongan berdasarkan sasaran kualitas permesinan yang diharapkan dikembangkan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode analitis yang dapat digunakan untuk menghitung tinggi scallop yang dihasilkan dari suatu proses permesinan milling lima sumbu. Jika tinggi scallop dapat dihitung maka proses parameter dapat ditentukan sebelum permesinan dimulai. Dalam penelitian ini pahat potong yang digunakan adalah pahat toroidal. Beberapa parameter seperti sudut inklinasi, sudut miring dan sudut spiral pahat diperhitungkan dalam algoritma yang dikembangkan.



Gambar 2.3 Peta jalan penelitian

Peneliti utama dalam penelitian ini telah mengembangkan berbagai metode analitis untuk mengembangan permesinan virtual untuk menghitung parameter permesinan pada proses permesinan milling lima sumbu sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Beberapa paper telah dipublikasikan pada berbagai Seminar Nasional, Seminar Internasional maupun Jurnal Internasional. Daftar publikasi dapat dilihat pada biodata penulis di lampiran.

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT

Salah satu kelemahan dalam sistem permesinan *Computer Numerical Control* (CNC) saat ini adalah hanya menggunakan satu parameter pemotongan (seperti *feedrate* dan *cutting speed*) untuk keseluruhan proses permesinan. Hal ini menyebabkan efisiensi proses permesinan menjadi sangat rendah. Oleh karena itu banyak studi yang dilakukan untuk menghasilkan sebuah pendekatan yang disebut dengan permesinan virtual (*virtual machining*). Salah satu tujuan dari dikembangkannya permesinan virtual adalah agar gaya pemotongan (*cutting force*) dan kualitas permukaan hasil permesinan dapat dihitung sehingga produktifitas dan kualitas proses permesinan dapat ditingkatkan. Penelitian yang diusulkan ini merupakan bagian dari pengembangan permesinan virtual yang bertujuan untuk menghitung parameter permesinan yang optimal agar dihasilkan kualitas permesinan yang baik. Jika tinggi *scallop* dapat dihitung sebelum proses permesinan berlangsung maka akan melengkapi hasil penelitian terdahulu (dijelaskan pada subbab 2.2 tentang peta jalan penelitian) terkait perhitungan gaya pemotongan. Jika keduanya digabungkan, parameter permesinan seperti *feedrate*, *cutting speed* dan *step-over* dapat dipilih secara optimal sehingga waktu permesinan dapat lebih cepat dan kualitas yang dihasilkan sesuai dengan toleransi yang diharapkan.

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi 3 tahapan yaitu: 1) fase pengembangan model matematika; 2) fase pengembangan program simulasi; dan 3) fase validasi model yang dilakukan secara simulasi dan pengujian eksperimental. Rincian dari masing-masing fase dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pengembangan Model Matematika

Peneltian ini dimaksudkan untuk mengembangkan model matematika agar parameter permesinan yang optimal pada proses permesinan lima sumbu dapat diperoleh. Algoritma matematika yang dikembangkan adalah berdasarkan kombinasi dari persamaan parametik geometri pahat toroidal dan *cutter location* (CL) data yang diperoleh dari software Computer Aided Manufacturing (CAM). Dalam penelitian ini software yang digunakan adalah Siemens-NX.

Metode matematika yang digunakan merupakan pengembangan dari metode *Analytical Boundary Simulation* yang telah disampaikan oleh Hendriko et al. [11, 12, 29]untuk menghitung *Cutter Workpiece Engagement*. Beberapa hal yang dilakukan dalam pengembangan model matematika untuk menghitung tinggi scallop adalah:

1. Menentukan kurva tersapu. Kurva tersapu dikembangkan dengan menggunakan metode untuk menentukan *grazing point*. *Grazing point* diperoleh dengan menggunakan fungsi tangen yang terdiri dari permukaan normal dari benda kerja ($N_{S_T(\vartheta,\varphi,p)}$) dan vektor arah pergerakan pahat ($V_{S_T(\vartheta,\varphi,p)}$) atau dapat dituliskan sebagai $F_{(\vartheta,\varphi,p)} = N_{S_T(\vartheta,\varphi,p)} . V_{S_T(\vartheta,\varphi,p)} = 0$. Dengan menentukan grazing point pada setiap sudut rotasi (φ) maka kurva tersapu akan terbentuk. Metode grazing yang digunakan untuk menentukan titik singgung bawah (*lower engagement point*) sebagaimana dilaporkan pada [11] diimplementasikan untuk menghitung kurva tersapu. Selanjutnya, tinggi scallop yang dibentuk oleh persinggungan antara dua kurva tersapu yang saling berurutan dapat ditentukan. Scallop yang muncul dari persinggungan dua lintasan pahat disebut dengan *path scallop*
2. Scallop tidak hanya terbentuk dari hasil permesinan dua lintasan pahat namun juga ditemukan diantara dua putaran pahat atau yang disebut dengan *feed scallop*. Pada pahat

bola, *feed scallop* bisa tiga kali lebih besar dibanding dengan *path scallop* pada permesinan dengan kecepatan pemakanan yang tinggi [30].

3. Algoritma matematika yang dikembangkan memperhitungkan pengaruh beberapa parameter seperti sudut inklinasi dan sudut spiral pahat. Keberadaan sudut spiral akan mempengaruhi orientasi pahat sebenarnya.

Pengembangan Program Simulasi

Model matematika yang dikembangkan diimplementasikan ke dalam simulasi komputer yang dikembangkan menggunakan Software Matlab. Model benda kerja dan lintasan pahat akan diperoleh dari software Siemens NX. Informasi terkait geometri pahat, lintasan pahat dan parameter permesinan kemudian dijadikan input dalam perhitungan menggunakan program simulasi. Program simulasi yang dikembangkan selain dapat digunakan untuk menghitung tinggi scallop pada setiap lokasi pahat, namun juga dapat menampilkan bentuk permukaan hasil proses permesinan.

Validasi Model

Untuk membuktikan bahwa hasil perhitungan yang diperoleh dari program simulasi akurat, maka model yang dikembangkan perlu divalidasi. Ada dua model validasi yang dilakukan, pertama adalah dengan menggunakan Siemens-NX, dan yang kedua adalah dengan melakukan uji ekperimen menggunakan mesin milling tiga sumbu dan mesin milling lima sumbu. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa ukuran diameter dan *minor radius* pahat toroidal untuk memastikan kemampuan model yang dikembangkan. Selain itu kemampuan model yang dikembangkan juga diuji dan dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan menggunakan pahat datar (*flat-end mill*) dan pahat bola (*ball end mill*)

4.2. Luaran dan Indikator Capaian

Berdasarkan tujuan dan keutamaan dari penelitian ini, luaran dan indikator yang digunakan untuk mengukur hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metode analisis berupa algoritma matematika untuk menghitung tinggi scallop baik *path scallop* dan *feed scallop* pada mesin milling lima sumbu dapat diselesaikan.
2. Program simulasi mampu menghitung tinggi scallop berdasarkan metode analisis yang dikembangkan dan dapat menampilkan bentuk scallop permukaan hasil permesinan dapat dibangun.
3. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat dihasilkan minimal 1 artikel pada Jurnal Internasional dan 1 artikel pada Seminar Internasional yang terindex Scopus.

BAB V

HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1. Tinggi Scallop Lintasan Menggunakan Pahat Datar

Memilih jenis pahat yang digunakan pada proses permesinan milling bukanlah sebuah pekerjaan yang mudah. Terdapat banyak parameter yang perlu dipertimbangkan. Namun pada dasarnya seorang operator mesin akan selalu berusaha memilih pahat yang dapat memotong material diinginkan dengan biaya yang semurah mungkin. Terdapat beberapa jenis geometri pahat yang dapat digunakan pada proses permesinan milling. Dari beberapa jenis tersebut, tiga jenis geometri pahat yang umum digunakan adalah: pahat datar (*flat-end mill cutter*), pahat toroidal (*toroidal cutter*), dan pahat bola (*ball-end mill cutter*). Ketiga jenis pahat tersebut telah diteliti tentang keefektifannya dalam proses permesinan dengan permukaan rumit [16, 31, 32]. Pahat datar adalah pahat yang paling banyak digunakan karena memiliki keunggulan dimana lebar sisi kontak lebih lebar sehingga laju pemakanan menjadi lebih tinggi dan akhirnya waktu permesinan menjadi lebih singkat [31].

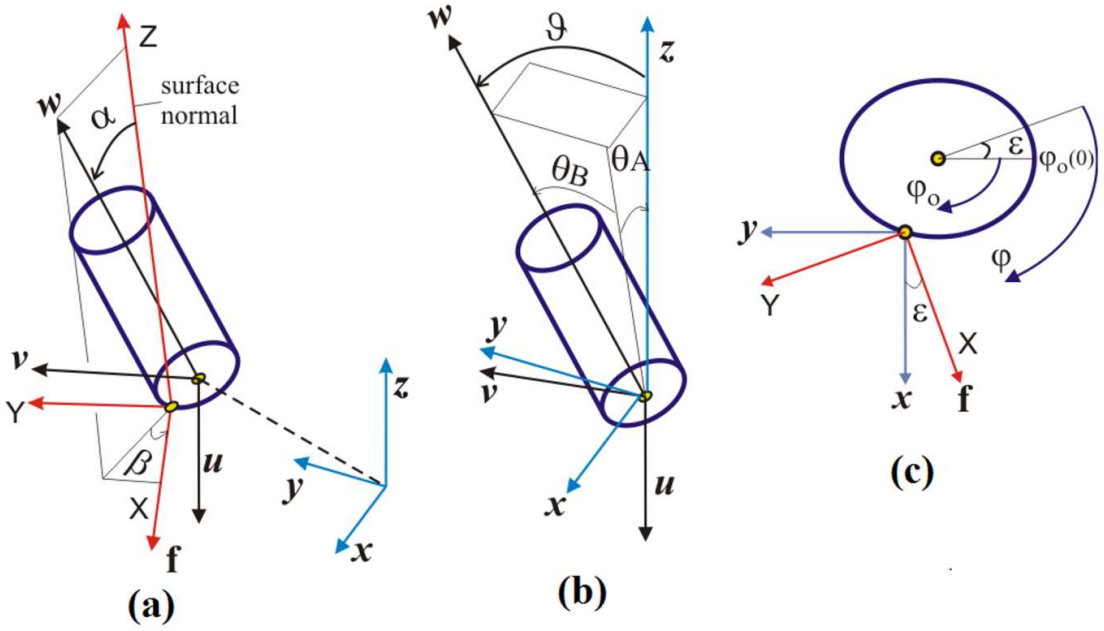
Beberapa penelitian [14,19,20,28] mengembangan model untuk menghiung tinggi scallop untuk pahat bola agar memperoleh lintasan pahat yang optimal. Sementara penelitian lainnya [23,33,34] menginvestigasi dampak dari sudut inklinasi (*inclination angle*) dan sudut miring (*tilt angle*) terhadap tinggi scallop pada permesinan milling lima sumbu. Hasil penelitian menunjukan bahwa dengan menggunakan sudut inklinasi yang sama, pahat datar menghasilkan tinggi scallop yang lebih kecil dibandingkan dengan pahat bola dan pahat toroidal. Tinggi scallp tidak berubah dengan berubahnya sudut inklinasi ketika proses pemotongan menggunakan pahat bola. Sementara jika menggunakan pahat toroidal, tinggi scallop akan berkurang siknifikan ketika sudut inklinasi kecil. Dengan kata lain bahwa pahat data akan menghasilkan tinggi scallop yang lebih kecil jika proses pemotongan menggunakan sudut inklinasi yang sama. Semakin besar sudut radius dari sebuah pahat toroidal, semakin besar scallop yang dihasilkan, dan sebaliknya.

Banyak studi yang sudah dicurahkan untuk menghitung tinggi scallop pada saat permesinan dengan permukaan bebas (*free-form surface machining*). Beberapa peneliti [15-17,35,36] melakukan studi tentang keefektifan pahat datar pada proses permesinan benda dengan permukaan berbentuk kurva. Tinggi scallop dari pahat datar telah didefiniskan secara analitis

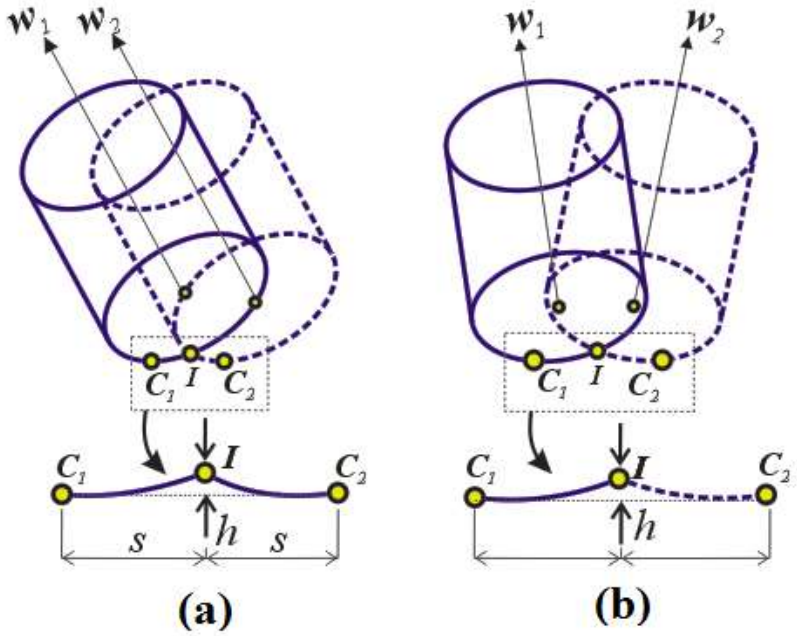
dengan menggunakan bentuk elip untuk mewakili bentuk pahat. Dari studi literatur di atas telah dijelaskan bahwa secara matematika bentuk kurva tersapu (swepth curves) dari pahat datar yang menggunakan sudut inklinasi tidak dapat secara akurat ditentukan dengan hanya menggunakan persamaan parametrik elips.

5.1.1. Perhitungan Tinggi Scallop

Pada permesinan lima sumbu, pahat dapat dirotasikan pada berbagai arah. Benda dengan permukaan rumit dapat dimesin dengan sangat efisien dengan cara mengendalikan pahat agar bergerak dan berputar secara dinamis terhadap permukaan normal benda. Untuk keperluan merepresentasikan permukaan pahat pada saat bergerak secara analitis, maka perlu dirumuskan operator yang digunakan untuk proses transformasi sistem koordinat. Oleh karena itu terdapat dua sistem koordinat sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 5.1b yang digunakan untuk mewakili posisi dan orientasi pahat, yaitu sistem koordinat benda kerja atau disebut *Workpiece Coordinate System* (WCS) dan sistem koordinat pahat atau disebut juga Tool Coordinate System (TCS). Untuk menghitung trasnformasi koordinat, perlu ditentukan kinematika spesifik yang diperlukan. WCS adalah sistem koordinat tetap yang direpresentasikan dengan simbol *x, y, z*, sementara TCS dilambangkan dengan *u, v, w*. Sudut inklinasi (α) dan sudut screw (*β*) yang biasanya digunakan permesinan milling lima sumbu ketika benda yang akan dimesin berbentuk rumit. Keduanya adalah sudut yang dibentuk oleh TCS dan WCS sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 a) Geometri pahat datar, b) koordinat sistem, c) tampak atas



Gambar 5.2 a) bentuk scallop dari dua lintasan pahat dengan sudut orientasi yang sama scallop height form from two cutting path with the same tool orientation, dan b) dengan sudut orientasi yang berbeda

Permukaan pahat datar dianggap sebagai permukaan sebuah silinder sebagaimana yang bisa dilihat pada Gambar 5.1. Persamaan parametrik untuk menghitung silinder adalah sebagai berikut:

$$G(\varphi; l) = \begin{bmatrix} R\,sin\,\varphi \\ R\,cos\,\varphi \\ l_n \end{bmatrix} \quad ; 0 < l_n < l \qquad 1$$

Dimana R adalah radius pahat potong, φ adalah sudut rotasi pahat atau disebut juga sudut persinggungan, dan l_n adalah jarak sebuah titik pada sisi potong yang diukur dari dasar sisi potong dan digunakan untuk menghitung panjang pemotongan. Karena data lokasi pahat dan informasi permukaan benda kerja disajikan dalam sistem koordinat benda kerja atau WCS, maka permukaan pahat ditransformasikan dari TCS ke WCS. Dan rumus menjadi:

$$G'(x'_G,\ y'_G, z'_G) = [M]\ G(\varphi; l) \qquad 2$$

Dimana [M] adalah operator transformasi (*transfromation operator*) yang didalamnya terdapat dampak dari beberapa variabel seperti: sumbu rotasi pahat pada sumbu-X (θ_A), sumbu rotasi pahat pada sumbu-Y (θ_B), dan translasi pada titik T. Dimana T adalah titik posisi pahat seketika

(*the instantaneous cutter location point*) yang berada pada titik center di dasar pahat. Operator transformasi dirumuskan sebagai berikut:

$$[\mathrm{M}] = \begin{bmatrix} cos\ \theta_B & 0 & sin\ \theta_B & x_S \\ sin\ \theta_A sin\ \theta_B & cos\ \theta_A & -sin\ \theta_A cos\ \theta_B & y_S \\ cos\ \theta_A sin\ \theta_B & sin\ \theta_A & cos\ \theta_A cos\ \theta_B & z_S \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3$$

Rumus untuk menentukan titik singgung antara kurva lintasan pahat saat ini (curve 1) dan kurva pada lintasan pahat seberang (curve 2), yang disebut titik singgung lintasan atau *path intersection point* (I), diturunkan dengan mengacu kepada Gambar 5.2a dan Gambar 5.2b. Karena pahat memiliki orientasi relatif terhadap WCS, maka titik singgung berada di tengah-tengah antara C_1 and C_2. Jarak antara titik singgung terhadap CC-point dihitung sebagai berikut:

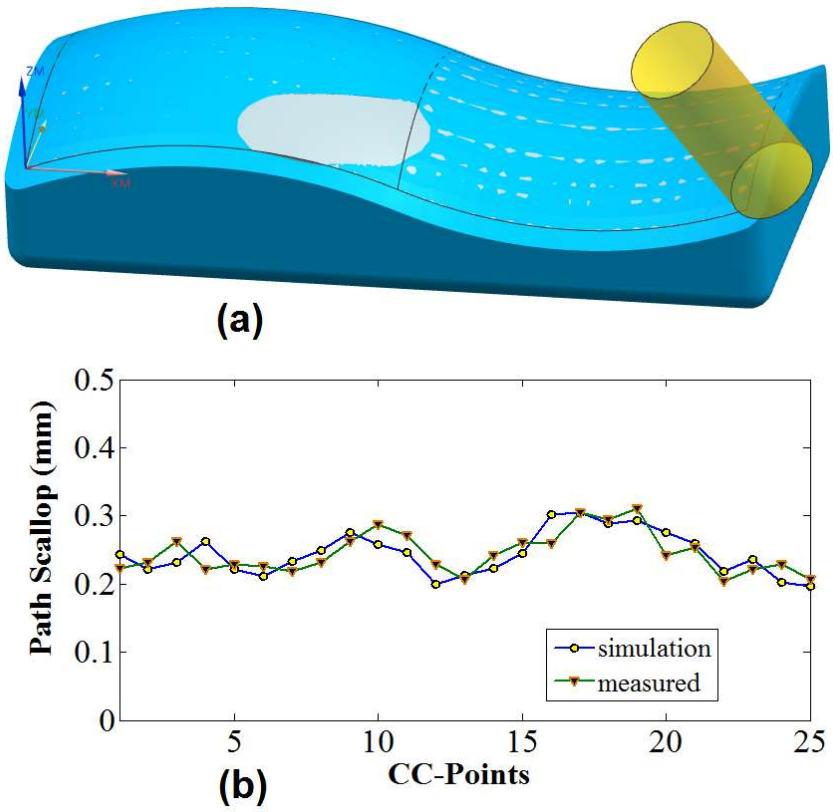
$$s(x_s;\ y_s;\ z_s) = |C_1 - C_2|/2 \quad 4$$

Koordinat titik singgung antara dua kurva $I\left(x_{I_C}, y_{I_C}, z_{I_C}\right)$, dapat didefiniskan setelah sudut singgung (φ) diperoleh. Karena titik singgung berada di tengah-tengah antara C_1 and C_2, maka kedua kurva tersebut memiliki sudut singgung yang sama. Dengan menganggap bahwa gerakan makan adalah pada sumbu-X, maka $I_{G1}(\varphi;\ \theta_{A1};\ \theta_{B1}) = I_{G2}(\varphi;\ \theta_{A2};\ \theta_{B2})$, dimana I_{G1} adalah persamaan untuk titik singgung menggunakan persamaan kurva 1, dan I_{G2}adalah persamaan untuk menghitung titik singgung menggunakan persamaan parametrik kurva 2. I_{G1} dan I_{G2}ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$y_{I_C} = \left((r_m + r \sin\lambda_C)\cos\varphi\right)\cos\tau - (r - r\ \cos\lambda_C) sin\ \tau \quad 5$$

5.1.2. Implementasi dan Diskusi

Berdasarkan formula yang disusun pada subbab sebelumnya, program simulasi dengan menggunakan Matlab turut dibangun. Pada bagian ini, metode analitis yang diusulkan diverifikasi dengan menggunakan model benda kerja dan produk seperti terlihat pada Gambar 5.3a. Verifikasi dilakukan dengan menggunakan feedrate yang tinggi agar diperoleh scallop yang tinggi sehingga proses verifikasi dapat dilakukan dengan lebih mudah. Feedrate yang dipilih adalah 1 mm/gigi.

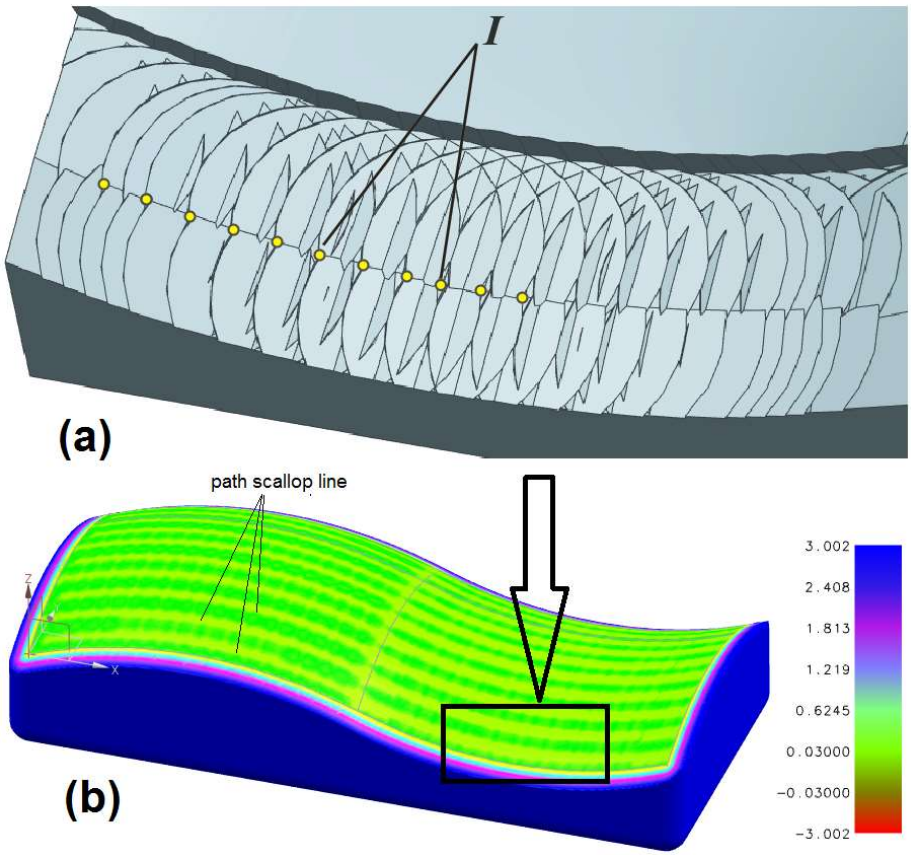


Gambar 5.3 a) Model test, b) tinggi scallop yang dihitung dan diukur

Pahat datar dengan dua gigi berdiameter 12.5 mm digunakan sebagai pahat potong. Pahat di atur dengan menggunakan sudut inklinasi 1° dan *step over* 8 mm. Dengan menggunakan program simulasi yang dikembangkan yang disebut Analytical Boundary Simulation (ABS), koordinat titik singgung dapat dihitung dan selanjutnya tinggi scallop dapat ditentukan. Tinggi scallop untuk setiap titik lokasi pahat dalam satu putaran yang telah dihitung menggunakan metode ABS ditampilkan pada Gambar 5.3.

Untuk kebutuhan verifikasi, tinggi scallop dihitung menggunakan ABS dibandingkan dengan tinggi scallop yang diukur dengan menggunakan software Siemens-NX. Koordinat titik singgung dicek dari model ekstraksi yang diperoleh dari interseksi antara pahat dan benda kerja. Model ekstraksi diperoleh dengan cara meletakan model pahat pada lokasi pahat dan selanjutnya orientasi pahat diatur. Setelah itu persinggungan antara model benda kerja dan model pahat dapat diekstrak sebagaimana yang terlihat pada Gambar 5.4a. Setelah model ekstraksi diperoleh, koordinat titik interseksi (I) dapat diperiksa dan akhirnya tinggi scallop dapat diukur. Tinggi scallop lintasan untuk setiap lokasi pahat dalam satu putaran pahat diverifikasi dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 5.3b, Dapat dilihat bahwa semua pengujian

menghasilkan kesalahan yang relatif kecil (secara umum lebih kecil dari 6%). Gambar 5.4b menunjukan benda akhir yang diperoleh dari proses manufaktur di Siemens-NX. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa scallop lintasan masih dalam batasan tinggi scallop yang diijinkan, baik yang diperoleh melalui cara dihitung maupun diukur. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa metode analitis yang digunakan untuk menghitung scallop lintasan untuk pahat datar hasilnya akurat.



Gambar 5.4 a) verifikasi menggunakan model ekstraksi di Siemens-NX, b) verifikasi menggunakan proses manufaktur di Siemens-NX

5.2. Scallop Pemakanan Dengan Pahat Toroidal

Sebenarnya, scallop tidak hanya muncul diantara dua lintasan pahat, atau yang disebut scallop lintasan, tetapi juga ditemukan diantara dua lintasan pemakanan, atau yang disebut scallop pemakanan (*feed scallop*). Pada pahat bola, tinggi scallop pemakanan dapat mencapai tiga kali lebih besar dari scallop lintasan pada saat proses permesinan dengan feedrate yang tinggi [20]. Menaikan feedrate tentunya akan meningkatkan tinggi scallop pemakanan. Permesinan dengan pahat bola akan menghasilkan scallop lintasan dan juga scallop pemakanan meskipun pahat tidak menggunakan sudut inklinasi dan permukaan benda kerja datar. Sementara itu untuk pahat toroidal dan pahat datar, scallop lintasan hanya muncul ketika pahat menggunakan sudut

inklinasi atau ketika benda memiliki bentuk permukaan datar, atau kombinasi dari kedua kondisi tersebut. Agar diperoleh kualitas permukaan sebagaimana yang diharapkan, scallop harus dikendalikan dengan baik. Namun karena rumitnya bentuk permukaan benda yang akan dibuat dan orientasi pahat maka scallop sulit dihitung dan juga tidak mudah direpresentasikan. Dalam menentukan lintasan pahat pada proses permesinan dengan bentuk benda yang rumit, metode untuk menghitung tinggi scallop secara akurat masih menjadi tantangan.

5.2.1. Titik Singgung Pemakanan

Scallop pemakanan untuk dua jenis pahat toroidal, pahat bulat dan setengah bulat, diilustrasikan pada Gambar 1. Titik kontak antara gigi pahat (*cutting tooth*) saat ini dan titik pahat pada pergerakan pahat berikutnya disebut dengan titik singgung pemakanan atau disebut juga *feed intersection point* (FI-point) yang dilambangkan dengan I. Gambar ?? dan Gambar ?? menunjukan scallop pemakanan dan FI-point ketika pahat diatur tanpa sudut inklinasi. Lokasi FI-point antara pahat bulat dan pahat setengah bulat berbeda. FI-point pahat bulat terletak diantara dua titik singgung terendah, titik singgung saat ini ($C(x_C, y_C, z_C)$) dan itik singgung berikutnya ($C'(x_{C"}, y_{C"}, z_{C"})$). Metode untuk mendefinisikan koordinat titik singgung pada setiap sudut singgung (φ) dideskripsikan pada [12, 37]. Jarak antara C dan I untuk pahat bulat dihitung sebagai berikut:

$$g = f/2 \qquad 6$$

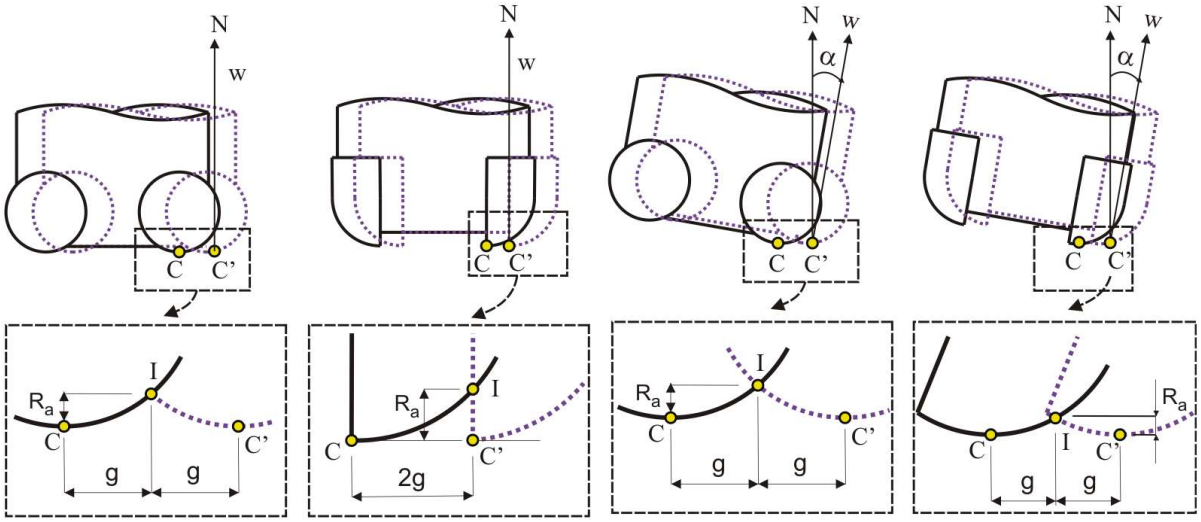
dimana f adalah pemakan per gigi. Sementara itu untuk pahat setengah bulat, persinggungan terjadi antara sisi bulat dari posisi pahat saat ini dan sisi lurus dari posisi pahat berikutnya. Jarak antara C dan Iuntuk pahat setengah lingkaran adalah $2g$.

Gambar 5.5 mengilustrasikan FI-point ketika terdapat sudut inklinasi. Untuk pahat bulat, lokasi FI-point sama dengan pahat tanpa sudut inklinasi. Pada sisi lain, putaran pahat akibat dari sudut inklinasi membuat FI-point dari pahat setengah lingkaran juga terletak pada sisi bulat dari pahat posisi berikutnya. Sehingga metode untuk menghitung lokasi titik singging dari pahat bulat juga dapat digunakan untuk pahat setengah bulat.

Salah satu ciri dari pahat toroidal adalah: secara geometri pahat tersebut dibentuk oleh dua permukaan, permukaan silinder dan permukaan toroidal. Meskipun pahat toroidal dibentuk oleh dua permukaan, namun kurva tersapu (*swept curve*) pahat tersebut hanya terletak pada

permukaan toroidal. Representasi permukaan toroidak terhadap sistem coordinat pahat digambarkan oleh:

$$S_T(\varphi;\lambda)\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(r_m+r\sin\lambda)\sin\varphi\\(r_m+r\sin\lambda)\cos\varphi\\r-r\cos\lambda\end{bmatrix} \quad 7$$



Gambar 5.5 Variasi lokasi titik singgung pemakanan karena bentuk pahat dan sudut inklinasi yang berbeda

Gambar 5.6 menunjukan pandangan atas dari titik singgung ketika terdapat sudut inklinasi. Sementara itu Gambar ?? memperlihatkan kondisi dimana pahat tanpa sudut inklinasi. Karena perubahan orientasi pahat selama proses permesinan dengan kecepatan tinggi sangat kecil, maka dianggap bahwa tidak ada perubahan orientasi pahat antara posisi pahat saat ini dengan posisi pahat berikutnya. Oleh karena itu, jarak antara $C(x_C, y_C, z_C)$ dan $I(x_I, y_I, z_I)$ pada setiap titik di kurva tersapu adalah tetap. Koordinat titik singgung terhadap gigi pahat posisi saat ini dapat ditentukan setelah sudut toroidal (λ_I) dan sudut singgung (φ_I) diperoleh. Dengan mengacu kepada Gambar 5.6 maka sudut-sudut tersebut diperoleh dengan menggunakan rumus berikut:

$$\varphi_I = \tan^{-1}\left(\frac{x_C+g}{y_C}\right) \quad 8$$

Setelah φ_I diperoleh, kemudian sudut toroidal dari FI-point dihitung dengan menggunakan rumus Eq.2 khusus untuk menghitung nilai *x*. Dimana sumbu-X dari titik persinggungan (x_I) adalah sama dengan $x_C + g$. Sehingga persamaan untuk menghitung $\lambda_I$adalah sebagai berikut:

$$x_C + g = (r_m + r \sin \lambda_I) \sin \varphi_I \quad (9)$$

$$\lambda_I = \sin^{-1}\left(\frac{x_C + g - r_m \sin \varphi_I}{r \sin \varphi_I}\right) \quad (10)$$

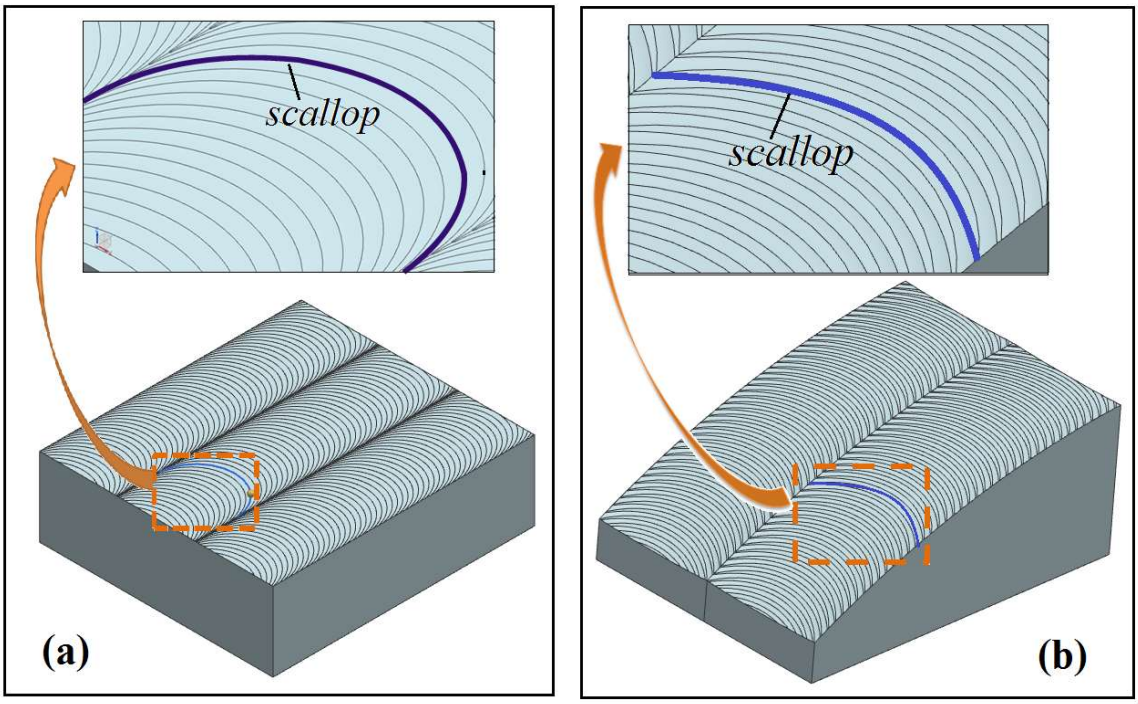
Setelah φ_I dan $\lambda_I$diperoleh, koordinate FI-point pada WCS dapat dihitung sebagai berikut:

$$I'(x_{I'}, y_{I'}, z_{I'}) = [\mathrm{M}]\, S_T(\varphi_I; \lambda_I) \quad (11)$$

Akhirnya tinggi scallop dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$h = r - r \cos(\lambda_I - \lambda_C) \quad (12)$$

Dimana λ_C adalah sudut toroidal dari LE-point yang diperoleh dengan menggunakan metode grazing [12, 37].



Gambar 5.7 Model untuk verifikasi

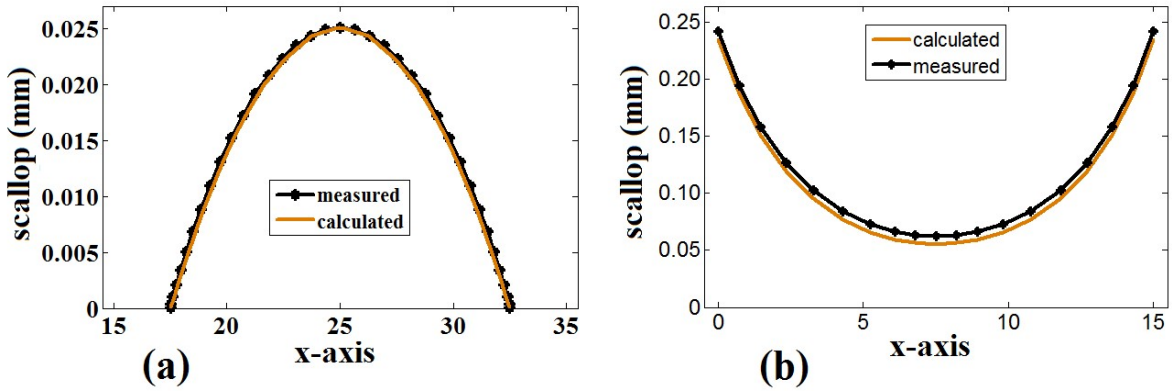
5.2.2. Implementasi dan Diskusi

Berdasarkan formula yang diturunkan untuk menghitung scallop pemakanan pada subbab sebelumnya, maka simulasi program menggunakan Matlab dibangun. Pada bagian ini metode analitis yang disusun diuji dengan menggunakan dua model benda yang memiliki permukaan berbeda sebagaimana yang ditunjukan pada Gambar 5.7. Pengujian dilakukan dengan

menggunakan feedrate yang tinggi agar scallop yang dihasilkan cukup besar sehingga proses verifikasi menjadi lebih mudah. Feedrate yang dipilih adalah 1 mm/gigi.

Pahat toroidal dengan diameter 30 mm dan radius minor 5 mm digunakan dalam proses pengujian metode. Pada pengujian pertama, pahat melakukan proses milling sederhana dengan permukaan benda kerja datar. Dalam permesinan ini sudut inklinasi pahat dipilih konstan sebesar 5^{o}. Bentuk permukaan hasil permesinan ditampilkan pada Gambar 5.7. Lintasan pahat disusun dengan menggunakan *step over* sebesar 17.5 mm. Pada pengujian kedua, proses milling multi axis telah dilaksanakan dan hasilnya ditunjukan pada Gambar 3b. Pahat telah diatur tanpa menggunakan sudut inklinasi. Lintasan pahat disusun dengan mengatur jarak *step over* sebesar 15 mm.

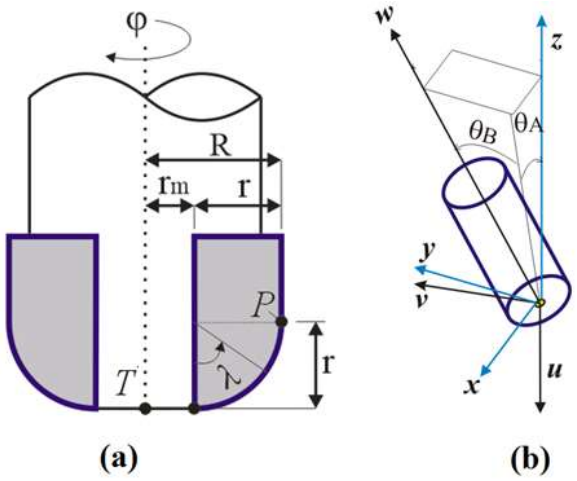
Dengan menggunakan program simulasi yang dibangun, scallop dapat dihitung sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 4. Untuk memeriksa akurasi model yang diusulkan, scallop untuk satu putaran pahat sebagaimana yang disorot pada Gambar 5.7a dan Gambar 5.7b telah diuji. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan scallop yang dihitung dengan menggunakan ABS dan scallop yang diukur menggunakan software komersil Siemens-NX. Tinggi scallop telah diperiksa pada persinggungan antara model benda kerja dan model pahat dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 5.8. Dari grafik yang ditunjukan terlihat bahwa hasil pengujian menghasilkan perbedaan yang relatif kecil atau secara umum lebih kecil dari 6%. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa metode analitis yang dibangun menghasilkan perhitungan yang akurat.



Gambar 5.8 Grafik hasil pengujian a) untuk model uji 1, b) untuk model uji 2

5.3. Scallop Lintasan Dengan Pahat Toroidal

Secara geometri, pahat toroidal dibangun oleh dua permukaan, permukaan silindris dan permukaan toroidal seperti terlihat pada Gambar 5.9. Namun, meskipun pahat toroidal dibangun oleh dua permukaan, titik singgung antara pahat dan benda kerja pada proses permesinan hanya terjadi di sisi toroidal. Rumus untuk menentukan geometri pahat toroidal sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya.



Gambar 5.9 a) Geometry of cutting tool, b) tool orientation due to inclination angle

Pada permesinan 5 derajat kebebasan, pahat dapat diarahkan ke segala arah. Komponen dengan permukaan yang rumit dapat dimesin dengan sangat efisien dengan cara mengatur gerak dan putaran pahat secara dinamis terhadap permukaan normal dari komponen yang akan dibuat. Untuk kebutuhan simulasi maka dalam model yang dibangun ditentukan tiga buah sistem koordinat untuk menentukan orientasi pahat, yaitu: sistem koordinat benda kerja (SKB), sistem koordinat lokal (SKL), dan sistem koordinat pahat (SKP). SKB adalah koordinat sistem tetap yang diwakilkan oleh x, y, z, dan SKP direpresentasikan dengan X, Y, Z. Sementara untuk SKL di simbolkan dengan u, v, w. Sistem koordinat lokal ditentukan dengan menggunakan rumus berikut,

$$w = \begin{bmatrix} cos\,\alpha & 0 & sin\,\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\,\alpha & 0 & cos\,\alpha \end{bmatrix} [0 \quad 0 \quad 1\,]^T = [sin\,\alpha \quad 0 \quad cos\,\alpha]^T \qquad 13$$

$$v = \frac{w \times V_T}{|w \times V_T|} \;\; ; \;\; u = v \times w \qquad 14$$

Selanjutnya kurva tersapu dicari dengan menggunakan metode titik sentuh (*grazing point*) sebagaimana yang dijelaskan oleh [31, 32]. Kurva tersapu dihitung dengan menggunakan fungsi tangen sebagai berikut,

$$F_{(\vartheta,\varphi,p)} = N_{S_T\,(\vartheta,\varphi,p)}.V_{S_T\,(\vartheta,\varphi,p)} = 0 \tag{15}$$

dimana $\boldsymbol{N_{S_T(\varphi)}}$ adalah permukaan normal pahat dan $\boldsymbol{V_{S_T}}$ adalah vektor pergerakan pahat. Dengan metode yang sama, setiap titik pada kurva tersapu untuk setiap sudut singgung dapat dihitung. Permukaan normal dari titik sembarang $\mathbf{Q}$ yang berada pada permukaan toroidal pada TCS ditentukan sebagai berikut,

$$N_{S_T} = \frac{\partial S_T/\partial\lambda}{|\partial S_T/\partial\lambda|} \times \frac{\partial S_T/\partial\varphi}{|\partial S_T/\partial\varphi|} = \begin{bmatrix} sin\,\lambda\,.\,sin\,\varphi \\ sin\,\lambda\,.\,cos\,\varphi \\ -\,cos\,\lambda \end{bmatrix} \tag{16}$$

ketika Eq.(16) ditransformasikan ke SKL maka rumusnya berubah menjadi,

$$N_{S_T'(\vartheta,\varphi,p)} = sin\,\lambda\,.\,sin(\varphi)\,.\,u + sin\,\lambda\,.\,cos(\varphi)\,.\,v - cos\,\lambda\,.\,w \tag{17}$$

Kecepatan titik sembarang Q di permukaan toroidal dihitung sebagai berikut,

$$V_{S_T} = V_T + \omega \times \overrightarrow{TQ} \tag{18}$$

dimana $\boldsymbol{\omega}$ dan $\boldsymbol{\overrightarrow{TQ}}$ merupakan kecepatan angular dan vektor posisi dari $\boldsymbol{T}$ ke $\boldsymbol{Q}$. Pada model yang dikembangkan dianggap bahwa pahat adaalah statis sehingga tidak ada gerakan angular ($\boldsymbol{\omega = 0}$). Dan kecepatan linear adalah $\boldsymbol{f}$ ($\boldsymbol{V_T = f}$). Maka fungsi tangen berubah menjadi,

$$\begin{aligned} F_{(\vartheta,\varphi,p)} = {} & sin\,\lambda\,.\,sin(\varphi)\,.\,(V_T.u) + sin\,\lambda\,.\,cos\,(\varphi)\,.\,(V_T.v) \\ & + cos\,\lambda\,.\,(V_T.w) = 0 \end{aligned} \tag{19}$$

Disebabkan $\boldsymbol{V_T}$ tegak luru terhadap $\boldsymbol{v}$, maka $\boldsymbol{V_T.v = 0}$. Dengan demikian maka sudut toroidal titik tersapu terhadap sudut singgung dapat dihitung sebagai berikut,

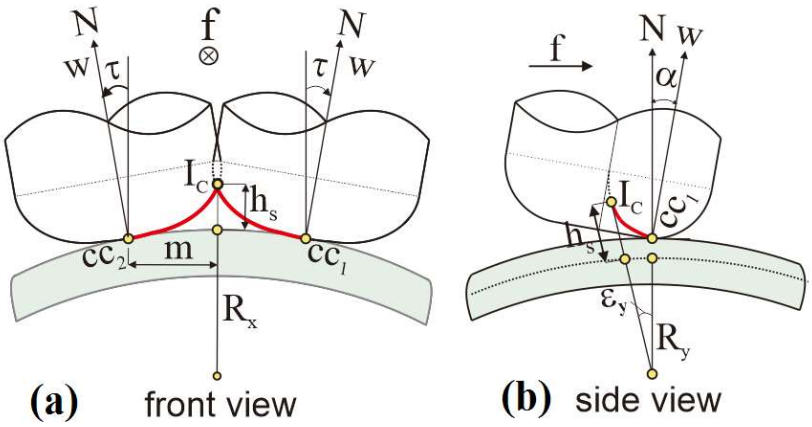
$$\lambda_{(\varphi)} = tan^{-1}\left[\frac{V_T.w}{sin(\varphi).(V_T.u)}\right] \tag{20}$$

Setelah $\boldsymbol{\lambda_{(\varphi)}}$diperoleh, koordinat kurva tersapu terhadap perubahan sudut singgung di SKB dapat dihitung sebagai berikut,

$$I_{(\varphi)}(x_I, y_I, z_I) = [\mathrm{M}]\, S_T\left(\varphi_I; \lambda_{(\varphi)}\right) \quad (21)$$

5.3.1. Menentukan Titik Potong Lintasan

Rumus untuk menentukan titik potong antara kurva tersapu lintasan pahat saat ini dengan kurva tersapu lintasan sebelumnya, atau yang disebut titik potong ($\boldsymbol{I_C}$), dirumuskan dengan cara mengacu kepada Gambar 5.10. Karena orientasi pahat diatur tidak menggunakan sudut miring (*tilt angle)*, maka sudut CC-point ($\boldsymbol{\tau}$) lintasan pahat saat ini dan lintasan pahat berikutnya adalah sama. Hal ini membuat titik potong terletak diantara titik $\boldsymbol{CC_1}$ dan $\boldsymbol{CC_2}$. Jarak antara titik potong ke titik CC ($\boldsymbol{s}$) dan sudut CC ($\boldsymbol{\tau}$) point relatif terhadap permukaan benda dihitung menggunakan rumus berikut,



Gambar 5.10 Intersection point of adjacent tool path, a) front view, b) side view

$$s = |CC_1 - CC_2|/2 \quad (22)$$

$$\tau = sin^{-1}(s/R_1) \quad (23)$$

dimana $\boldsymbol{R_1} = \sqrt{\boldsymbol{R_x^2} + \boldsymbol{R_y^2}}$. Akibat sudut $\boldsymbol{\tau}$, maka koordinat titik tersapu di TCS ditransformasikan ke SKL. Koordinat transformasi dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\mathrm{I_C}\begin{bmatrix} \mathrm{x_{I_C}} \\ \mathrm{y_{I_C}} \\ \mathrm{z_{I_C}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\tau & -\sin\tau \\ 0 & -\sin\tau & \cos\tau \end{bmatrix} \times \mathrm{S_T}\left(\varphi_{\mathrm{I_C}}; \lambda_{\mathrm{I_C}}\right) \quad (24)$$

Koordinat $\boldsymbol{I_C}\ (\boldsymbol{x_{I_C}}, \boldsymbol{y_{I_C}}, \boldsymbol{z_{I_C}})$ dapat dicari setelah sudut toroidal dari titik potong ($\boldsymbol{\lambda_{I_C}}$) diperoleh. Ditinjau dari sistem koordinat lokal maka $\boldsymbol{y_{I_C}} = \boldsymbol{s}$. Karena $\boldsymbol{y_{I_C}}$ sudah diperoleh, maka selanjutnya $\boldsymbol{\lambda_{I_C}}$ dapat dicari dengan mengektraks Pers.(24) hanya untuk $\boldsymbol{y_{I_C}}$ sebagai berikut,

$$y_{I_C} = \left(\left(r_m + r\ sin\,\lambda_{\mathrm{I_C}}\right) cos\,\varphi_{I_C}\right) cos\,\tau - \left(r - r\ cos\,\lambda_{\mathrm{I_C}}\right) sin\,\tau \qquad 25$$

Terdapat dua variabel yang tida diketahun pada Pers.(25), $\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{I_C}}}$ dan $\boldsymbol{\varphi_{I_C}}$. Oleh karena itu maka salah satu diantara mereka harus dikonversikan sehingga terdapat hanya satu variabel yang tidak diketahui. Dengan mengatur ulang Pers.(20), maka persamaan baru diperoleh sebagai berikut,

$$cos(\varphi_{I_C}) = \left[\frac{\sqrt{\left((V_T.u)\ sin\,\lambda_{I_C}\right)^2 - \left((V_T.w)\ cos\,\lambda_{I_C}\right)^2}}{(V_T.u)\ sin\,\lambda_{I_C}}\right] \qquad 26$$

Setelah mengubah $\boldsymbol{cos(\varphi_{I_C})}$ pada Pers.(15) dengan $\boldsymbol{cos(\varphi_{I_C})}$ pada Pers.(16), akhirnya Pers.(15) berubah menjadi persamaan polinomial sebagai berikut,

$$\begin{aligned}(a^2)t^8 + (2ab)t^7 + (2ac + b^2 + f^2)t^6 + (2ad + 2bc)t^5 \\ + (2ae + 2bd + c^2 - f^2)t^4 + (2be + 2cd)t^3 \\ + (2ce + d^2)t^2 + (2de)t + (e^2)\end{aligned} \qquad 27$$

dimana,

$$\begin{aligned}t &= sin\,\lambda_{I_C} \\ a &= [(r^2(V_T.u)^2 + r^2(V_T.w)^2)\,cos\,\varepsilon + r^2(V_T.u)^2\,sin^2\,\tau] \\ b &= [2r_m r\,cos^2\,\varepsilon\,((V_T.u)^2 + (V_T.w)^2)] \\ c &= [(r_m{}^2(V_T.u)^2 + r_m{}^2(V_T.w)^2 - r^2(V_T.w)^2)\,cos^2\,\tau \\ &\quad - (r(V_T.u)\,sin\,\tau + y(V_T.u))^2 - (r^2(V_T.u)^2\,sin^2\,\tau)] \\ d &= [-2r_m r(V_T.w)^2\,cos^2\,\tau] \\ e &= [-r_m{}^2(V_T.w)^2\,cos^2\,\tau] \\ f &= \left[-2\left(r(V_T.u)\,sin\,\tau + y(V_T.u)\right)(r(V_T.u)\,sin\,\tau)\right]\end{aligned} \qquad 28$$

Akar polinomial dapat dicari dengan menggunakan software Matlab. Dari Pers.(17), terdapat delapan akar yang dihasilkan. Namun hanya satu dari delapan akar tersebut yang memenuhi untuk digunakan menentukan titik singgung. Akar yang benar ditentukan melalui beberapa ketentuan berikut,

a. t harus berada antara 0 dan 1,

b. Jika terdapat lebih dari satu t yang berada antara 0 dan 1, maka yang benar adalah t yang menghasilkan $y_{I_C} = s$.

Jika $\boldsymbol{\lambda_{I_C}}$ sudah diperoleh maka sudut singgung dapat dihitung. Koordinat titik $\boldsymbol{I_C}\ \left(\boldsymbol{x_{I_C}}, \boldsymbol{y_{I_C}}, \boldsymbol{z_{I_C}}\right)$ dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini,

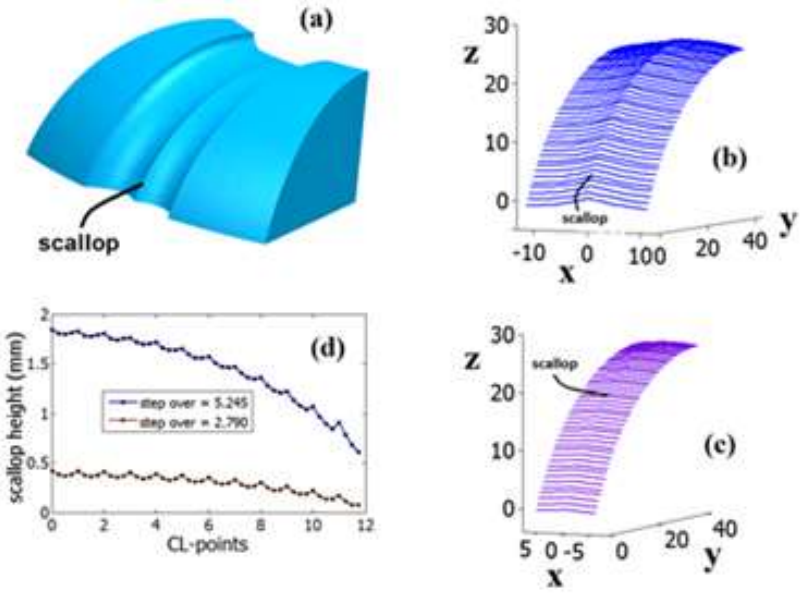
$$I_C\ \left(x_{I_C}, y_{I_C}, z_{I_C}\right) = [\mathrm{M}]\ S_T\ \left(\varphi_{I_C}; \lambda_{I_C}\right) \tag{29}$$

Akhirnya, tinggi scallop dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$h = r - r\ cos(\lambda_{I_C}) \tag{30}$$

5.3.2. Implementasi dan Diskusi

Pengujian dengan menggunakan benda kerja dan lintasan pahat seperti terlihat di Gambar 5.11 telah dilakukan. Sudut inklinasi selama proses permesinan diatur agar menurun secara bertahap sejalan dengan pergerakan pahat ke atas. Kondisi permesinan digunakan pada pengujian ini adalah feedrate 0.3 mm/tooth dan spindle speed 5000 rpm. Pahat milling dengan dua gigi berdiameter 20 mm dan radius minor 5 mm digunakan sebagai pahat potong. Dengan menggunakan metode yang diusulkan, bentuk permukaan benda hasil pemotongan dapat dihasilkan. Dengan menggunakan model komponen yang sama, pengujian juga dilakukan sebanyak dua step over yang berbeda, yaitu 5.245 mm dan 2.79 mm. Bentuk permukaan benda kerja hasil permesinan yang produksi menggunakan program simulasi yang dikembangkan dapat dilihat pada Gambar 5.11b dan 5.11c. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa bentu permukaan benda kerja yang diperoleh dari program simulasi yang dikembangkan mirip dengan bentuk permukaan yang dihasilkan dari proses manufaktur menggunakan software Siemens-NX. Hal ini mengindikasikan bahwa metode yang diusulkan akurat. Tinggi scallop terhadap CC-points ditunjukan pada Gambar 5.11d. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar step over maka akan meningkatkan tinggi scallop.



Gambar 5.11 Model pengujian, b) perubahan scallop dengan step over 5.245 mm, c) perubahan scallop dengan step over 2.790 mm, d) tinggi scallop

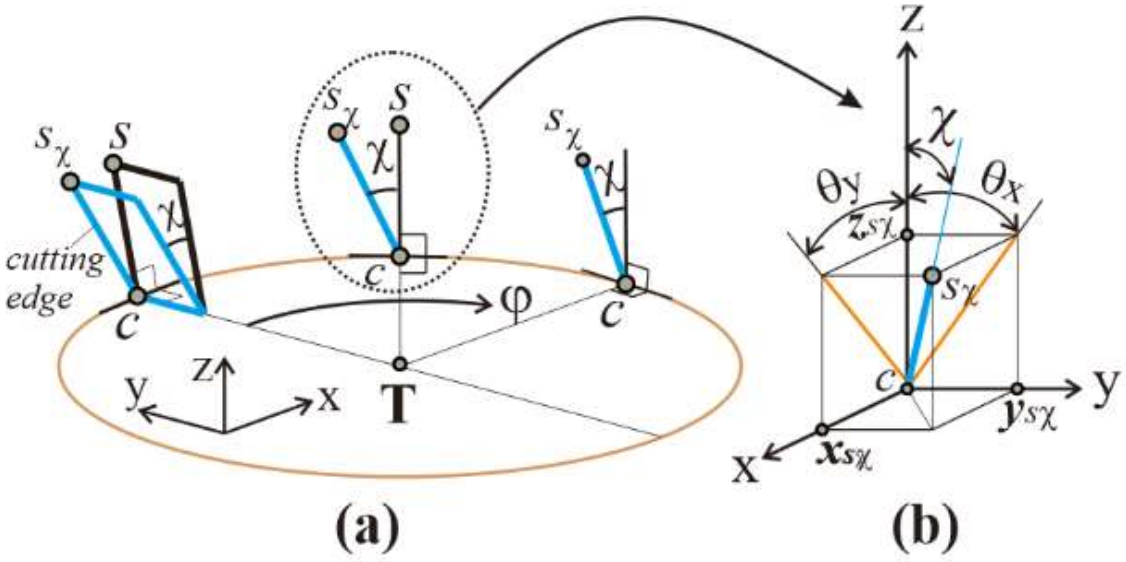
5.4. Pengaruh sudut helikal Terhadap Orientasi Pahat dan Kurva Tersapu

Pahat milling dengan gigi lurus memiliki kekurangan dimana pahat masuk ke material secara keseluruhan sehingga membutuhkan usaha yang besar. Hal ini mungkin saja menghasilkan hentakan yang mengakibatkan getaran yang merusak kualitas permukaan benda hasil proses permesinan. Oleh karena itu maka pahat dengan sudut helikal yang digunakan untuk menghilangkan permasalahan tersebut. Sudut helikal atau yang disebut juga sudut lag pada pahat solid dimaksudkan agar proses pemotongan berlangsung secara gradual. Sudut helikal juga menghasilkan panjang pemotongan yang lebih besar. Pada bagian ini, dampak dari sudut helikal terhadap orientasi pahat potong dan bentuk kurva tersapu akan dibahas.

5.4.1. Identifikasi Orientasi Pahat

Ketika sudut helikal digunakan pada pahat potong maka orientasi sisi potong akan berubah. Orientasi sisi potong akan berbeda dengan orientasi pahat potong. Dengan asumsi bahwa pahat bergerak pada sumbu X, maka sudut helikal akan membuat pahat diputar pada sumbu Y seperti terlihat pada Gambar 5.12a. Orientasi pahat yang sebenarny dapat ditentuakn dengan menghitung koordinat dua titik pada sisi potong, yaitu: $s_\chi(x_{s_\chi}, y_{s_\chi}, z_{s_\chi})$ dan $c(x_c, y_{c,} z_c)$. Persamaan parametrik untuk menghitung pahat silinder digunakan untuk menentukan

koordinat kedua titik. Titik s_χ adalah s yang diputar pada sumbu Y oleh sudut helikal. Titik s adalah titik sembarang yang berada pada sisi potong ketiak $\varphi = 0$. Sementara itu titik c adalah tiik yang berada pada bagian bawah sisi potong. Berikut ini cara menentukan koordinat kedua titik tersebut sebagai dampak dari sudut helikal.



Gambar 5.12 Pengaruh sudut helikal terhadap orientasi sisi potong terhadap sudut kontak

$$s = (0, r_m, r + 5) \text{ and } c = (0, r_m, r) \quad 31$$

Dimana r_m adalah radius minor dari pahat potong. Selanjutnya koordinat titik s_χ dan titik c terhadap sudut kontak ditentukan dengan cara transformasi kedua titik tersebut pada sumbu Y dengan sudut helikal dan sumbu Z dengan sudut kontak.

$$s_\chi \begin{bmatrix} x_{s_\chi} \\ y_{s_\chi} \\ z_{s_\chi} \end{bmatrix} = Rot(Z, \varphi) \times Rot(Y, \chi) \times [s] \quad 32$$

$$s_\chi \begin{bmatrix} x_{s_\chi} \\ y_{s_\chi} \\ z_{s_\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\varphi & -sin\,\varphi & 0 \\ sin\,\varphi & cos\,\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} cos\,\chi & 0 & sin\,\chi \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\,\chi & 0 & cos\,\chi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad 33$$

$$c \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = Rot(Z, \varphi) \times [c] = \begin{bmatrix} cos\,\varphi & -sin\,\varphi & 0 \\ sin\,\varphi & cos\,\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad 34$$

Orientasi pahat potong relatif terhadap WCS akibat dari penggunaan sudut helikal dapat ditentukan dengan menghitung rotasi sisi potong pada sumbu X dan sumbu Y sebagaimana terlihat pada Gambar 5.12b. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\theta_{A_\chi} = tan^{-1}\left(\frac{y_{s_\chi} - y_C}{z_{s_\chi}}\right) \quad 35$$

$$\theta_y = tan^{-1}\left(\frac{x_{s_\chi} - x_C}{z_{s_\chi}}\right) \quad 36$$

$$\theta_{B_\chi} = tan^{-1}\left(\frac{\left(x_{s_\chi} - x_C\right) cos\,\theta_{A_\chi}}{z_{s_\chi}}\right) = tan^{-1}\left(tan\,\theta_y\, cos\,\theta_{A_\chi}\right) \quad 37$$

Karakteristik milling dengan permukaan kompleks adalah orientasi pahat dapat diarahkan ke manapun. Orientasi pahat ditentukan dengan menggunakan sudut orientasi $\theta_A$dan θ_B. Ketika sudut helikal digunakan, sudut orientasi sisi potong akan berubah. Orientasi sebenarnya dapat dicari dengan bantuan titik s_χ and titk c. Oleh karena itu maka s_χ dan c dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} s_\chi\left(x_{s_\chi}, y_{s_\chi}, z_{s_\chi}\right) & \\ &= Rot(X,\theta_A)\ \times\ Rot(Y,\theta_B) \times Rot(Z,\varphi) \\ &\times Rot(Y,\chi).[s] \end{aligned} \quad 38$$

$$c(x_C, y_C, z_C) = Rot(X,\theta_A)\ \times\ Rot(Y,\theta_B) \times Rot(Z,\varphi).[c] \quad 39$$

Jika s_χ dan c dapat ditentukan, maka orientasi sisi potong yang sebenarnya (θ_{A_χ}, θ_{B_χ}) dapat dicari. Sehingga akhirnya operator untuk transformasi koordinat ketika sudut helikal digunakan berubah menjadi,

$$\begin{aligned} [M]_h &= Rot\left(X,\theta_{A_\chi}\right)\ \times\ Rot\left(Y,\theta_{B_\chi}\right) \\ &= \begin{bmatrix} cos\,\theta_{B_\chi} & 0 & sin\,\theta_{B_\chi} \\ sin\,\theta_{A_\chi} sin\,\theta_{B_\chi} & cos\,\theta_{A_\chi} & -sin\,\theta_{A_\chi} cos\,\theta_{B_\chi} \\ -cos\,\theta_{A_\chi} sin\,\theta_{B_\chi} & sin\,\theta_{A_\chi} & cos\,\theta_{A_\chi} cos\,\theta_{B_\chi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 40$$

5.4.2. Pengaruh sudut helikal Terhadap Tinggi Scallop

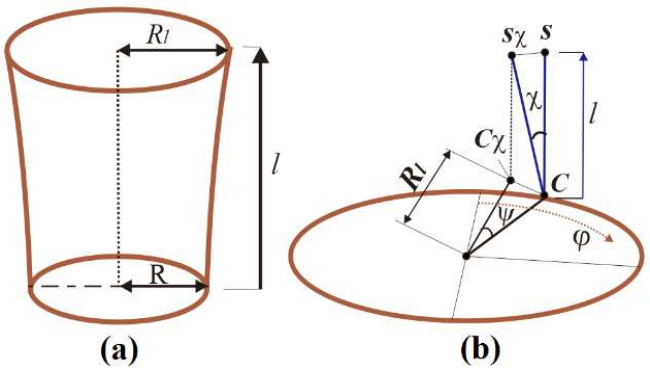
Bentuk kurva tersapu dari pahat potong solid selalu sama, baik pahat tersebut menggunakan sudut helikal maupun tidak. Kondisi yang berbeda ditemukan ketika pahat non solid yang digunakan. Sudut helikal memberi dampak terhadap kurva pemotongan. Sebagaimana terlihat pada Gambar **???,** ketika sudut helikal digunakan, radius pahat pada bagian bawah berbeda dengan radius pada sisi bagian atas (R_χ). Radius pahat potong sama dengan R hanya pada bagian bawah sedangkan pada bagian atas akan semakin besar (l).Oleh karena itu maka radius pahat potong aktual terhadap posisi pahat perlu dicari. Adapun rumus untuk mencari radisu sesungguhnya adalah:

$$\psi = tan^{-1}\big(((r - r\cos\lambda)\sin\chi)/(r_m + r\sin\lambda)\big) \quad 41$$

$$R_\chi(\lambda) = (r_m + r\sin\lambda)/\cos\psi \quad 42$$

$$G_{T_\chi}(\varphi;\lambda) = [R_\chi \sin\varphi \quad R_\chi \cos\varphi \quad (r - r\cos\lambda)\cos\chi]^{\mathrm{T}} \quad 43$$

Dimana $0 < \lambda < 90$ dan ψ adalah sudut lag sebagaimana terlihat pada Gambar 5.13a**?** Sudut lag adalah sudut kontak s_χ relatif terhadap sudut kontak s.



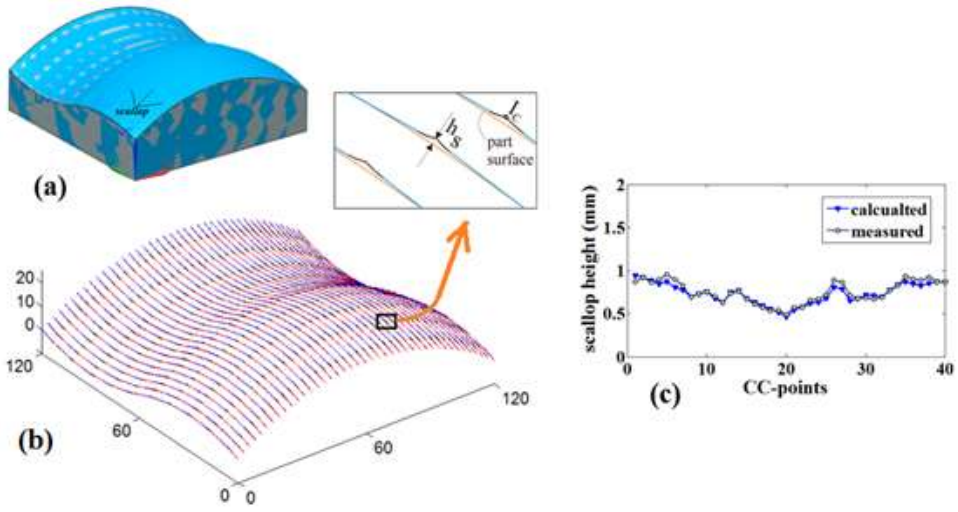
Gambar 5.13: a) Permukaan tersapu untuk pahat datar dengan sudut helikal, b) orientasi sisi potong

5.4.3. Implementasi dan Diskusi

Berdasarkan algoritma yang disusun pada subbab sebelumnya, sebuah simulasi program menggunakan Matlab telah dikembangkan. Sebuah pengujian telah dilakukan dengan menggunakan model uji seperti terlihat pada Gambar 5.14a. Verifikasi dilakukan menggunakan step over yang besar. Pada pengujian ini dipilih step-over sebesar 15 mm. Hal ini dimaksudkan agar diperoleh tinggi scallop yang besar sehingga proses verifikasi dapat

dilakukan dengan mudah. Kondisi permesinan yang digunakan pada pengujian tersebut adalah feedrate 0.3 mm/tooth dan kecepatan spindle 5000 rpm. Pahat toroidal dengan dua gigi dan sudut helikal 10 mm, diameter 20 mm dan radius minor 5 mm digunakan sebagai pahat potong. Dengan menggunakan metode yang diusulkan maka bentuk permukaan mesin dapat dihasilkan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.14b. Selain itu, titik koordinat perpotongan dapat ditentukan dan pada akhirnya tinggi scallop dapat dihitung.

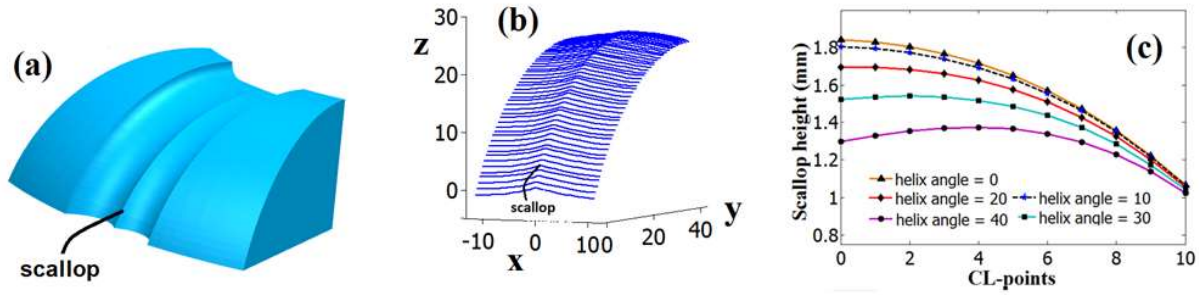
Metode yang diusulkan telah diverifikasi menggunakan software Siemens-NX. Bentuk permukaan benda kerja setelah dimesin menggunakan Siemens-NX ditampilkan pada Gambar 5.14b**.** Dari Gambar 14a dan Gambar 14b dapat dilihat bahwa bentuk scallop yang dihasilkan menggunakan simulasi mirip dengan bentuk permukaan yang dihasilkan Siemens-NX. Dan verifikasi selanjutnya dilakukan dengan membandingkan ukuran scallop yang dihitung menggunakan program simulasi dan diukur menggunakan Siemens-NX. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 14c. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semua data yang diuji menghasilkan perbedaan yang sangat kecil.



Gambar 5.14 a) Model Uji, b) permukaan hasil permesinan dihasilkan dari program simulasi, c) tinggi scallop hasil verifikasi

Kemampuan metode yang diusulkan untuk menguji pengaruh sudut helikal terhadap scallop juga dilakukan. Untuk kebutuhan verifikasi, sebuah model seperti terlihat pada Gambar 15a digunakan. Dalam pengujian ini digunakan lima jenis sudut helikal, yaitu: 0, 10, 20, 30, dan 40. Dengan menggunakan program simulai maka permukaan benda termesin untuk satu lintasan pahat dapat dihasilkan seperti terlihat pada Gambar 15b. Tinggi scallop untuk setiap CC-point untuk semua pengujian dihitung dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 15c. Dari

gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa sudut helikal cenderung menurunkan tinggi scallop. Selain itu, penuruna sudut inklinasi juga akan menurunkan tinggi scallop.



Gambar 5.15 a) model uji, b) bentuk scallop, c) tinggi scallop untuk beberapa sudut helikal

5.5. Luaran Yang Dicapai

Dari penelitian ini telah dihasilkan beberapa artikel yang disajikan pada Seminar Internasional dan diterbitkan pada jurnal internasional. Artikel-artikel tersebut dikelompokan berdasarkan statusnya di bawah ini.

A. PUBLISHED

1. Hendriko Hendriko (**2017**) Mathematical Model for Calculating Scallop Height of Toroidal Cutter in Five-axis Milling, **Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 12 (19) (Scopus – Q3)**

2. Hendriko, H. (2017). Analytical Boundary Method for Obtaining Feed Scallop of Toroidal Cutter in Multi-Axis Milling. ***Key Engineering Materials***, *728*. (***Scopus Indexed – Q3***)

3. Hendriko, H. (2017). Path Scallop Calculation during Free-Form Surface Machining with Flat-End Cutter in Five-Axis Milling. ***DEStech Transactions on Engineering and Technology Research***, (apetc).

4. Hendriko, H., Akhyan, A., Kiswanto, G., & Duc, E. (2017). The Effect of Tool Orientation to Cut Geometry in Five-Axis Milling Using Analytical Boundary Simulation. In ***Key Engineering Materials*** (Vol. 719, pp. 149-153). (***Scopus Indexed – Q3***)

5. Hendriko, H., 2017, October. Effect of helical angle on path scallop calculation of flat-end cutter in multi axis milling. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1891, No. 1, p. 020052). AIP Publishing.

B. ACCEPTED

1. Hendriko Hendriko (2017). Effect of Helix Angle on Path Scallop Calculation of Flat End Cutter in Multi Axis Milling. *International Conference on Applied Science and Technology 2017 (ICAST 2017)*. Langkawi, Malaysia. (**Accepted** published in **Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC) - *Scopus Indexed – Q4***)

2. Hendriko Hendriko. A hybrid Analytical and Discrete Based Methodology to Calculate Path Scallop of Helical Toroidal Cutter in Five-Axis Milling. **International Conference on Mechanical Engineering 2017 (ICOME 2017)**. (Accepted by **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences - (Scopus – Q3)**)

3. Hendriko H. Geometric Modeling for Scallop Calculation of Toroidal Cutter in Five-axis milling. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. **[Accepted] (Scopus – Q3)**

BAB VI

RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

4.1 Jadwal Kegiatan

Penelitian ini direncanakan akan dilaksanakan dalam dua tahun. Di tahun pertama fokus kegiatan pada pengembangan model matematika scallop pemakanan untuk pahat toroidal dan scallop lintasan untuk pahat datar. Untuk tahun kedua adalah pengembangan model matematika untuk scallop lintasan pada pahat toroidal. Model yang akan dikembangkan juga akan melihat dampak dari penggunaan sudul helikal pada pahat potong.

Saat ini model matematika untuk scallop pemakanan pada pahat toroidal dan scallop lintasan pada pahat datar telah dibangun. Algoritma matematika juga sudah selesai dikerjakan. Model matematika tersebut baru hanya diuji dan diverifikasi dengan menggunakan Siemens-NX. Pengujian dan verifikasi akan dilanjutkan dengan cara pengujian ekperimental.

Kegiatan	2016											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Studi Literatur												
Pengembangan model kurva tersapu (*swept curve model development*)												
Pengembangan algoritma *path scallop* untuk pahat datar												
Pengembangan algoritma *feed scallop* untuk pahat toroidal												
Pengembangan program simulasi												
Pengujian model dengan Siemens-NX												
Uji Eksperimen untuk validasi awal												
Persiapan paper untuk seminar internasional												
Laporan perkembangan dan laporan akhir tahun ke-1												

Gambar 6.1 Jadwal kegiatan tahun 2016

Kegiatan	2017											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Studi Literatur												
Pengembangan algoritma *path scallop* untuk pahat toroidal												
Pengembangan algoritma matematika dampak penggunaan sudut helix												
Membangun program simulasi untuk menampilkan bentuk scallop												
Validasi Model dengan menggunakan Siemens NX												
Validasi Model dengan cara uji eksperimen.												
Persiapan paper untuk jurnal internasional												
Laporan perkembangan dan laporan akhir tahun ke-2												

Gambar 6.2 Jadwal kegiatan tahun 2017

BAB VII
KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam penelitian ini metode analitis untuk menghitung *path scallop* untuk pahat datar dan *feed scallop* untuk pahat toroidal telah dikembangkan. Dari hasil implementasi dan pengujian dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Metode yang dikembangkan dapat diaplikasikan untuk menghitung *path scallop* untuk pahat datar dan *feed scallop* untuk pahat toroidal pada proses permesinan bentuk permukaan bebas.
2. Hasil validasi membuktikan bahwa metode yang dikembangkan akurat. Uji perbandingan menunjukan bahwa tinggi scallop hasil perhitungan dengan metode analitis yang dikembangkan dan hasil uji menggunakan Siemens-NX menunukan hasil yang hampir sama.

DAFTAR PUSTAKA

1 Mason, F. (1995). Die and mold finishing, how fast? Manufacturing Engineering 115 (3) 35:48.

2 Kurt M, Bagci E (2011) Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future directions. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 55(9-12):1037-1067.

3 Altintas Y, Spence A, Tlusty J. (1991) End milling force algorithms for CAD systems. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 40(1): 31-34.

4 Spence A.D. and Altintas Y. (1994) A solid modeler based milling processs simulation and planning system. Trans ASME J. Eng.Ind. 116(1): 61–69

5 Fleisig R.V., Spence A.D. (2005) Technique for accelerating B-rep based parallel machining simulation. Computer Aided Design. 37 (12): 1229-1240

6 Can A. and Ali Ü. (2010). A novel iso-scallop tool-path generation for efficient five-axis machining of free-form surfaces. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 51.9-12: 1083-1098.

7 Park J.W., Shin Y.H., Chung Y.C. (2005) Hybrid cutting simulation via discrete vector model. Computer Aided Design 37(4):419-430

8 Lee, Sung-Gun, Hyun-Chul Kim, and Min-Yang Yang. (2008) Mesh-based tool path generation for constant scallop-height machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 37.1-2: 15-22.

9 Zhu, Hu, Zhijun Liu, and Jianhui Fu. (2011). Spiral tool-path generation with constant scallop height for sheet metal CNC incremental forming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 54.9-12: 911-919.

10 Tunc LT, Budak E (2009) Extraction of 5 axis milling conditions from CAM data for process simulation. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 43(5-6):538-550

11 Kiswanto G, Hendriko H, Duc E. (2014). An analytical method for obtaining cutter workpiece engagement during a semi-finish in five-axis milling.Computer-Aided Design 55:81-93.

12 Hendriko, Duc E, Kiswanto G. (2013). Analytical method for obtaining Cutter Workpiece Engagement in Five-Axis Milling. Part 3: Flat-end Cutter and Free-Form Workpiece Surface. Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems. Springer International Publishing: 705-716.

13 Gupta SK, Saini SK, Spranklin BW, Yao Z. (2005). Geometric algorithms for computing cutter engagement functions in 2.5D milling operations. Computer Aided Design 37(14): 1469-1480

14 Vickers G.W., and Quan, K.W. (1989). Ball mills versus end mills for curved surface machining. ASME journal of Engineering in Industry, 111 (22).

15 Ralph W.L. and Loftus, M. (1992) Cusp geometry analysis in free-form surface machining", International Journal of Production Research, 30 (2697).

16 Cho H.D., Juan Y.T., Yang M.Y. (1993), Five axis CNC milling for effective machining of sulptured surface", International Journal of Production Research, 31 (11).

17 Bedi S., Ismail F, Mahjoob M.J, Chen Y. (1997) . Toroidal versus Ball Nose and Flat Bottom-End Mill", Int. Journal of Advance Manufacturing Technology 13: 326-332.

18 Feng, H.Y. and Li H. (2002). Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining. Computer-Aided Design 34 (9):647-654

19 Lin R. and Koren Y. (1996) Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces. ASME Journal of Engineering For Industry 118 : 20-28

20 Sarma R. and Dutta D. (1997). The geometry and generation of NC tool path"Journal of mechanical design 119 : 253-258.

21 Suresh K. and Yang, D.C.H. (1994). Constant scallop height machining of free-form surfaces. Journal of Engineering for Industry 116 : 253-259.

22 Warkentin A, Bedi S, Ismail F. (1996). 5-axis milling of spherical surfaces. International journal of machine Tools and Manufacture 36: 229-43.

23 Ozturk E, Tunc L.T., Budak B. (2009). Investigaton of lead and tilt angle effect in 5-axis ball-end milling processes. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, 49: 1053-1062.

24 Senatore J, Segonds S, Rubio W, Dessin G. (2012) Correlation between machining direction , cutter geometry and step over distance in 3-axis milling: Application to milling by zones. Computer-Aided Design 44: 1151-1160.

25 Wang XC and Yu Y. (2002). An approach to interference-free cutter position for five-axis free-form surface side finishing milling"Journal of Materials Processing Technology 123 (2):191-196

26 Chen Z.C. and Song D. (2006) A practical approach to generating accurate iso-cusped tool paths for three-axis CNC milling of sculptured surface parts, Journal of Manufacturing Process 8(1): 29-38.

27 Tsao C.C. and Chen W.C. (1997). Effects of cutting parameters on the scallop size during the milling processes, Journal of Material Processing Technology 72(2): 208-213

28 Zhang X.F., Hie J., Li L.H. (2012). Experimental investigation on various tool path strategies influencing surface quality and form accuracy of CNC milled complex freeform surface, Int. J. Adv. Manuf. Technology 58 (5-8): 647-654.

29 Hendriko, Duc, Emmanuel, and Kiswanto G. (2013). Analytical Cut Geometry Prediction for Free Form Surface During Semi-Finish Milling. ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 41st North American Manufacturing Research Conference. American Society of Mechanical Engineers.

30 Lin, R. and Koren, Y. (1996). Efficient tool-path planning for machining free-form surfaces. ASME Journal of Engineering For Industry. (118): 20-28

31 Chiou C.J, Lee YS. 2002. Swept surface determination for five-axis numerical control machining. Int. J. Mach. Tools and Manuf; 42:1497-1507.

32 Weinert K, Du S, Damm P, Stautner M. 2004 Swept volume generation for the simulation of machining processes. Int. J. Mach. Tools and Manuf. 44:617-628.

LAMPIRAN 1

VOL. 12, NO. 19, OCTOBER 2017 ISSN 1819-6608
ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences
©2006-2017 Asian Research Publishing Network (ARPN). All rights reserved.

www.arpnjournals.com

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING SCALLOP HEIGHT OF TOROIDAL CUTTER IN FIVE-AXIS MILLING

Hendriko Hendriko
Politeknik Caltex Riau, Pekanbaru, Riau Indonesia
E-Mail: hendriko@pcr.ac.id

ABSTRACT

The scallop height is the most substantial variable in determining the quality of machined surface. Many analytical approacheswere proposed to calculated the scallop height infive-axis milling.Most of them addressed the issue of scallop height for toroidal cutter by approximating the inclined cutting tool using two common primitive geometries, either circle or ellipse.This paper presents an analytical method to calculate the scallop height of toroidal cutter produced by predefined tool path in five-axis milling. The present study was aimed to improve the drawback of the existing method in representing the swept curve of inclined toroidal cutter. In this study, the swept curve was calculated analytically by adopting the method to calculate the grazing point in swept envelope development. The coordinate of intersection point was calculated by using the combination of swept curve algorithm and coordinate mapping equations. The proposed method was successfully used to generate scallop height data for two machining processes with different step over.

Keywords: scallop height, toroidal cutter, grazing toroidal approximation, five-axis milling.

1. INTRODUCTION

Many products, such as mould and dies, are designed with free-form surfaces. Currently, those part surfaces are often produced by five-axis milling. Theoretically, five-axis milling offers better efficiency than three-axis milling in producing complex part surface. In five-axis milling, the tool orientation relative to the workpiece can be controlled by two additional degrees of freedom. However, the additional degrees of freedom created complexity as well as flexibility compared to three-axis milling.

Machining free-form part is normally involving a huge number of tool movements. Consequently, it is both a long and costly process. Considering the time needed for finishing and polishing which could consume as much as 75% of the total machining time [1], therefore, selecting and controlling the cutting conditions and the strategies employed to increase product quality become very important.

In general, there are three parameters that are commonly used to control the accuracy of the machined surface: 1) machining tolerance, 2) scallop height, and 3) surface roughness. In multi-axis milling, scallop height becomes the most substantial component in determining the quality of mahined surface. It is influenced by four factors, 1) cutting tool geometry, 2) tool orientation, 3) part surface geometry, and 4) the distance between adjacent tool path (step over). In order to achieve the expected surface quality, the scallop must be well controlled. However, due to the complexity of the part surface and tool orientation, scallop height is difficult to calculate and it cannot be represented easily. In developing tool path for free-form surfaces, the method to determine the scallop height accurately is still a major challenge.

Many studies developed the method to calculate the scallop height during sculptured surface machining. Most of the proposed method calculated the scallop height usinganalytical approaches. Analytical approachwas used to calculate the cut geometry and scallop height in five axis milling because it was much faster and more accurate when compared to the discrete approaches [2-4]. Several researchers [5-8] have performed the study on the effectiveness of inclined flat end mills in the machining of curved surfaces. The results show that flat-end mill produces smaller scallops as compared to ball-end mill. Other studies [9-13] proposed method for calculating the scallop height for ball-end mill to achieve optimal tool path. Ozturk *et al.* [14] investigated the effect of tool orientation to the scallop height in five-axis milling. Meanwhile [8, 13,15] addressed the issue of scallop height for toroidal cutter by simply assumed that the curvature was constant and cutter geometry was approximated by two common primitive geometry, either circle or ellipse.

Senatore *et al.* [10] represented the tool swept envelope by calculating the effective radius of toroidal cutter due to the inclination angle. Then the scallop height with respect to radius of part surface was calculated and finally the optimal step over can be determined. Others studies [5-12, 15, 16] defined the inclined flat and ball end mills as an ellipse. Mathematically, the shape of swept curves (SV) of inclined flat and ball end mill, which are projected into 2D, can be precisely determined by parametric equation of ellipse curve. However, this approach is not applicable to toroidal cutter. Toroidal cutter is decomposed into cylindrical surface and toroidal surface, consequently, determining the swept curve when the inclination angle existsbecomes much more complicated. This statement will be prooved in the section of Implementation and Discussion.

This paper presents an analytical method to calculate the scallop height of toroidal cutter produced by predefined tool path in five-axis milling. The present study was addressed to improve the drawback of the existing method in representing the swept curve of inclined toroidal cutter. In this study, the swept curve was calculated analytically by adopting the method to calculate the grazing point in swept envelope development. The coordinate of intersection point was calculated by using

2017 Asia-Pacific Engineering and Technology Conference (APETC 2017)
ISBN: 978-1-60595-443-1

Path Scallop Calculation during Free-Form Surface Machining with Flat-End Cutter in Five-Axis Milling

Hendriko Hendriko

ABSTRACT

This paper presents an analytical method to calculate path scallop height during free-form surface machining with flat-end cutter in five-axis milling. In this study the effect of lead angle and tilt angle were taken into consideration in the calculation. The scallop height was determined from the coordinate of the path intersection point. Path intersection point is an intersection between the cutting tool of the current tooth path and the previous tooth path. One model part with free-form surface was tested to verify the validity of the proposed method, the result proved that the method was accurate.

1 INTRODUCTION

Multi-axis CNC milling is a key technology in machining a complex part with free-form surface. Application can be found in the milling of dies and mold, jet engine parts, pump blade, and biomedical parts. Technically, machining a small part will only take a few minutes in overall mass production, while dies, molds and aerospace parts in fact may take several days of machining when accuracy, precision and productivity become a critical factor in the economic survival of the manufacturing industry.

Selecting a milling cutter is not a simple task. There are many variables that need to be considered. But essentially the machinist is trying to choose a tool that cut the material to the required specification for the least cost. Many types of cutting tool geometry that can be used in five-axis milling operation. Among them, however, three cutting tool types in term of geometry are commonly used: flat-end cutting tool, toroidal cutting tool and ball-end cutting tool. These types of tools have been studied for the effectiveness in the machining of sculptured surfaces [1-3]. Flat-end milling is more desirable than ball-end milling since it offers many advantages such as larger machining width, higher material removal rate and less machining time [2].

Several studies [4-7] developed model for calculating the scallop height for ball-end mill to achieve optimal tool path. Meanwhile several researchers [8-10] investigated the effect of both inclination and tilt angle to the scallop height in five-axis milling. The studies showed that, with the same tool inclination angle, a

Hendriko Hendriko*
Mechatronics Department, Politeknik Caltex Riau, Pekanbaru, Riau, Indonesia
*Corresponding author: hendriko@pcr.ac.id

Key Engineering Materials
ISSN: 1662-9795, Vol. 728, pp 48-53
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.728.48
© 2017 Trans Tech Publications, Switzerland
Submitted: 2016-03-17
Revised: 2016-06-30
Accepted: 2016-08-17
Online: 2017-01-25

Analytical Boundary Method for Obtaining Feed Scallop of Toroidal Cutter in Multi-Axis Milling

Hendriko Hendriko[1, a*]

[1]Mechatronics Department, Politeknik Caltex Riau, Pekanbaru, Riau, Indonesia

[a]hendriko@pcr.ac.id

Keywords: Analytical boundary method, Feed scallop, Toroidal cutter, Multi axis milling

Abstract. This paper presents a new method to calculate the feed scallop height for a toroidal cutter during a free-form surface machining in multi-axis milling. The proposed method is an extended analytical boundary method to define the cut geometry during a free-form surface milling. The algorithm was developed by taken into account the existence of inclination angle. The proposed method was successfully implemented to calculate the scallop for two model parts with different surface profiles. The accuracy was verified by comparing the scallop height calculated using the proposed method with those measured using Siemens-NX. The results proved that the proposed method was accurate.

Introduction

In general, there are three parameters that are commonly used to control the accuracy of the machined surface: (1) machining tolerance, (2) scallop height, and (3) surface roughness. In five axis milling, scallop height, which is measured from the designed surface to the top of the rest material, become the most substantial component of the surface roughness. It is influenced by four factors, (1) cutting tool geometry, (2) tool orientation, (3) part surface geometry, and (4) the distance between adjacent tool path (step over).

Numerous works have been devoted to calculating the scallop height during a free-form part machining. Some researchers [1-4] have performed the study on the effectiveness of flat end mills in the machining of curved surfaces. The scallop height from inclined flat end mills are defined analytically. The results show that flat-end mill produces smaller scallops as compare to ball-end mill. Meanwhile [5-10] developed model for calculating the scallop height for ball-end mill to achieve optimal tool path. Several studies [11-13] investigated the effect of both inclination and tilt angle to the scallop height in five-axis milling. Other researchers [4, 14] addressed the issue for toroidal cutter in three-axis milling and [15] concentrated on toroidal cutter in five-axis milling. Several studies.

Actually, scallops do not only appear in between the successive cutting paths, or called as path scallop, but also found in between the successive feeds of cutting teeth, or called as feed scallop. In ball end cutting, feed-scallop height can be three times larger than the path scallop during high feedrate machining process [16]. Increasing feedrate will increase the feed-scallop height. Machining with ball-end mill produces both path-scallop and feed-scallop even though the tool without the inclination angle and the part surface is flat. Meanwhile for toroidal cutter and flat end cutter, the path-scallop only exist either when the tool with the inclination angle, or when the part surface is flat, or combination of both of them. In order to achieve the expected surface quality, the scallop must be well controlled. However, due to the complexity of the part surface and tool orientation, scallop height is difficult to calculate and it cannot be represented easily. In developing tool path for free-form surface, the method to determine the scallop height accurately is still a major challenge.

This paper presents an analytical method to calculate the feed scallop height of toroidal cutter produced by predefined tool path in multi-axis milling. The coordinate of intersection point was calculated using the combination of swept curve algorithm and coordinate mapping equation.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of Trans Tech Publications, www.ttp.net. (#73407577-30/01/17,11:24:40)

Key Engineering Materials
ISSN: 1662-9795, Vol. 719, pp 149-153
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.719.149
© 2017 Trans Tech Publications, Switzerland
Submitted: 2016-07-09
Revised: 2016-08-10
Accepted: 2016-08-15
Online: 2016-11-10

The Effect of Tool Orientation to Cut Geometry in Five-Axis Milling Using Analytical Boundary Simulation

Hendriko Hendriko[1,a], Amnur Akhyan[1,b], Gandjar Kiswanto[2,c] and Emmanuel Duc[3,d]

[1]Mechatronic Department, Politeknik Caltex Riau

[2]Laboratory of Manufacturing Technology and Automation Department of Mechanical Engineering, Universitas Indonesia

[3]Clermont Université, IFMA, UMR 6602, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

[a]hendriko@pcr.ac.id, [b]akhyan@pcr.ac.id, [c]gandjar_kiswanto@ng.ui.ac.id, [d]emmanuel.duc@ifms.fr

Keywords: Five-axis milling, cutter workpiece engagement, analytical boundary method

Abstract. One of the characteristics of five-axis milling is the tool can be oriented in any direction. It makes the tool orientation could be changed continuously during a free-form machining process. Consequently, the work to predict Cutter Workpiece Engagement (CWE) become more challenging. The existence of tool inclination angle and screw angle influence the profile of cut geometry. In this paper, an improved method to define the lower engagement point (LE-point) is presented. The algorithm was developed by taken into consideration the existence of inclination angle and screw angle. The extended method to calculate *grazing point* in swept envelope development was utilized to define LE-point. The developed model was successfully implemented to generate CWE data with various combination of tool orientation angle. From the test it was found that inclination angle gives significant effect to the location of LE-point.

Introduction

In supporting the machining optimization, the precise geometrical information is very important especially in the modeling and calculating of the cutting force. Various studies [1-3] in geometric simulation strategy based on solid modeling include constructive solid geometry (CSG) and boundary representations (B-Rep) have been conducted. Other researchers used discrete methods such as Z-mapping [4, 5], z-buffer [6] and octree method [7, 8] for determining engagement region between tool and workpiece along the tool path. Solid modeling gives more accurate information, but computation time significantly increased. Meanwhile discretization methods make the calculation become faster than solid modeling. However, the computation time increases intensely as the precision and accuracy is to be improved.

Hendriko et al. [9] proposed an hybrid method in defining CWE between flat-end tool and free-form workpiece surfaces. Hybrid model that is a combination of discrete vector model and analytical method was described in this paper. Workpiece surface was discretized by a number of normal vectors. Then, by using their coordinate and orientation, the surface shape at every instantaneous tool location can be defined mathematically. Another study for obtaining CWE of toroidal cutter during semi finish milling was also proposed by Hendriko et al. [10-12]. CWE was defined by defining two engagement points, lowermost engagement point (LE-point) and uppermost engagement point (UE-point). UE-point (n_f) was calculated using a method called toroidal boundary method. The proposed model was proven accurate; however, the effects of inclination angle and screw angle which are commonly exist in five-axis milling were not verified and discussed. For toroidal cutter, the existence of inclination angle give significant effect to the coordinate of LE-point (C).

This paper presents a verification test on the effect of inclination angle and screw angle to the cut geometry. The verification was performed to test the accuracy of Analytical Boundary Simulation (ABS) in calculating the cut geometry of inclined cutting tool during a free-form surface machining.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of Trans Tech Publications, www.ttp.net. (#70840678-27/10/16,15:02:53)

Politeknik Caltex Riau

hendriko . <hendriko@pcr.ac.id>

ICOME 2017 notification for paper 28

1 message

ICOME 2017 <icome2017@easychair.org> Wed, Aug 16, 2017 at 1:01 PM
To: Hendriko Hendriko <hendriko@pcr.ac.id>

Dear Hendriko,

On behalf of the ICOME 2017 Committee, and on the recommendation of the reviewers, we are pleased to inform you that your paper:
Title: A hybrid Analytical and Discrete Based Methodology to Calculate Path Scallop of Helical Toroidal Cutter in Five-Axis Milling
Paper ID: 28

has been accepted for ORAL presentation at the forthcoming 3rd International Conference on Mechanical Engineering, to be held on October 5-6, 2017 in Surabaya, Indonesia.

Papers that are "accepted and presented" in ICOME 2017 will be published in one of the following journals:
- AIP Conference Proceedings (Indexing: SCOPUS, SJR Scimago)
- Journal of Applied Mechanics and Materials (Indexing: SJR Scimago)
- Journal of Engineering and Applied Science ARPN (Indexing: SCOPUS, SJR Scimago)

Please prepare for your full paper by taking into consideration the reviewer comments. Use the template and comply strictly with the format and style of your preferred publications. Failure to do so may result in the delay of publication and/or rejection by the publisher.

Deadlines:
Early-registration: September 1, 2017
Camera-ready full paper: September 18, 2017
Late-registration: September 22, 2017

We thank you for submitting your paper and are looking forward to seeing you at the conference.

Sincerely yours,
Chairman of ICOME 2017,

Suwarno, Ph.D.
icome@its.ac.id

Politeknik Caltex Riau

hendriko . <hendriko@pcr.ac.id>

[ICAST 2017] Your submission has been accepted!

1 message

ICAST 2017 <icast.uum@gmail.com> Sat, Jan 14, 2017 at 5:06 PM
Reply-To: icast.uum@gmail.com
To: hendriko@pcr.ac.id

Dear hendriko hendriko,

On behalf of the International Conference on Applied Science and Technology 2017 Organising Committee, we are pleased to inform you that your submission:

Paper ID: 422
Paper Title: Effect of Helix Angle on Path Scallop Calculation of Flat End Cutter in Multi Axis Milling

has been reviewed by technical reviewer(s) and accepted for presentation at International Conference on Applied Science and Technology 2017.

You are therefore requested to submit camera-ready (CR) paper by 15th February 2017. Please refer the CR format and submission guidelines at http://icast-uum.com/ before submitting the paper. When submitting the CR paper, make sure you strictly follow the format and incorporate the reviewers' comments. We have included the reviewers' feedback at the end of this message.

In addition to CR submission you are required to fill in and sign the copyright form. The form can be found at http://icast-uum.com/

The extended version of your paper also has been considered to be published in the Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). You are also required to prepare an extended version of your paper for consideration to be published in JTEC. The template and the guidelines for this journal are also available in our website.

Please be informed that the publication fee should be paid before 28th February 2017. Paper(s) without payment will not be considered for publication. The details of the payment can be obtained at http://icast-uum.com/index.php/registration-2017

Papers, copyright form and proof of payment can be submitted to: azham.h@uum.edu.my or icast.uum@gmail.com

Congratulations and hope to see you in the ICAST 2017!

Best regards,
Program Committee, ICAST 2017
icast.uum@gmail.com

Politeknik Caltex Riau

hendriko . <hendriko@pcr.ac.id>

[ICAST 2016] List of submissions made

1 message

ICAST 2016 <icast.uum@gmail.com> Tue, Nov 22, 2016 at 8:22 AM
Reply-To: icast.uum@gmail.com
To: hendriko@pcr.ac.id

Per your request, here is a list of submissions made to the ICAST 2016 OpenConf system with you listed as the contact:

ID: 422
Title: Effect of Helix Angle on Path Scallop Calculation of Flat End Cutter in Multi Axis Milling

IP Address: 162.158.165.229

ICAST2017 International Conference on Applied Science and Technology 3-5 APRIL 2017. LANGKAWI ISLAND, MALAYSIA

ICBEF2017 International Conference on Business, Economics & Finance 3-5 APRIL 2017. LANGKAWI ISLAND, MALAYSIA

ICAST 2017 Parallel Session Schedule
3 April 2017 – Parallel Session 2 (02.00pm – 04.00pm)
Room 3

	02.00 – 02.15	02.15 - 02.30	02.30 – 02.45	02.45 – 03.00
Room 3	422 - Effect of Helix Angle on Path Scallop Calculation of Flat End Cutter in Multi Axis Milling *hendriko hendriko*	433 - Recognizing Stationary and Locomotion Activities using Combinational of Spectral Analysis with Statistical Descriptors Features *Muhammad Noorazlan Shah Zainudin, Md Nasir Sulaiman, Norwati Mustapha, Thinagaran Perumal, Azree Shahrel Ahmad Nazri*	476 - Modeling Activity Recognition of Multi Resident using Label Combination of Multi Label Classification in Smart Home *Raihani Mohamed, Thinagaran Perumal Perumal, Md Nasir Sulaiman, Norwati Mu, M.N.Shah Zainudin*	485 - Shoreline Extraction from Medium Resolution Satellite Images Using Majority Voting Ensemble Classifier *Syaifulnizam Abd Manaf*
	03.00 – 03.15	**03.15 - 03.30**	**03.30 – 03.45**	**03.45 – 04.00**
	535 - Development of Hand Exoskeleton For Rehabilitation of Post-Stroke Patient *Amran Mohd Zaid, Chu Chean Tee, Jumadi Abdul Sukor, Dirman Hanafi*	569 - Validation Assessment of Shoreline Extraction on Medium Resolution Satellite Image *Syaifulnizam Abd Manaf, Norwati Mustapha, Md Nasir Sulaiman, Nor Azura Husin, Helmi Zulhaidi Mohd Shafri*	434 - Digital Heritage Gamification: An Augmented-Virtual Walkthrough to Learn and Explore Historical Places *Kian Lam Tan, Chen Kim Lim*	591 - Excessive and Addictive Gaming Control Using Counselling Agent in Online Game Design *Sa'adah Hassan, Ididi Italumeh O., Abdul Azim Abd Ghani, Norhayati Mohd. Ali,*

Not secure | www.dpi-proceedings.com/index.php/dtetr/article/view/11161

DEStech Transactions on
ENGINEERING and TECHNOLOGY RESEARCH

PATH SCALLOP CALCULATION DURING FREE-FORM SURFACE MACHINING WITH FLAT-END CUTTER IN FIVE-AXIS MILLING

HENDRIKO HENDRIKO

ABSTRACT

This paper presents an analytical method to calculate path scallop height during free-form surface machining with flat-end cutter in five-axis milling. In this study the effect of lead angle and tilt angle were taken into consideration in the calculation. The scallop height was determined from the coordinate of the path intersection point. Path intersection point is an intersection between the cutting tool of the current tooth path and the previous tooth path. One model part with free-form surface was tested to verify the validity of the proposed method, the result proved that the method was accurate.

DOI
10.12783/dtetr/apetc2017/11161

FULL TEXT:
PDF

Medwell Journals
Scientific Research Publishing Company

Medwell Journals
Tel: +92-41-5003000
Fax: +92-41-8815599
http://medwelljournals.com

May 07, 2017

Politeknik Caltex Riau
Pekanbaru, Riau, Indonesia, 28265

Dear hendriko,

Based on the reviewer's recommendations, I am delighted to inform you that your following manuscript has been accepted for the publication in *Journal of Engineering and Applied Sciences*.

Title	Geometric Modelling for Scallop Height Calculation of Toroidal Cutter in Five-Axis Milling
Authors	Hendriko, Hendriko1, Amnur Akhyan1
Received on	May 01, 2017
Accepted on	May 07, 2017

Thank you very much for submitting your article to *"Journal of Engineering and Applied Sciences"*.

We look forward to receive more articles in future.

Best Regards

Muhammad Kamran
Journal of Engineering and Applied Sciences

3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING
(ICOME 2017)

Certificate of Participation

This is to certify that

Hendriko

Has/Have presented a paper titled:

A hybrid Analytical and Discrete Based Methodology to Calculate Path Scallop of Helical Toroidal Cutter in Five-Axis Milling

at the conference, organized by the Department of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, in Surabaya, Indonesia on 5-6 October 2017

Chairman of Conference

Bambang Pramujati, Ph.D

Suwarno, Ph.D