

Hendriko



# Mesin Freis 5 Sumbu

Pemodelan Geometri Tatal  
dan Optimasi Pemesinan



**MESIN FREIS 5 SUMBU**  
**Pemodelan Geometri Tatal**  
**dan Optimasi Pemesinan**

## UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Peggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Peggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hendriko

**MESIN FREIS 5 SUMBU**  
**Pemodelan Geometri Total**  
**dan Optimasi Pemesinan**



**MESIN FREIS 5 SUMBU  
PEMODELAN GEOMETRI TATAL DAN OPTIMASI PEMESINAN**

**Hendriko**

Desain Cover :  
**Dwi Novidiantoko**

Sumber :  
www.shutterstock.com

Tata Letak :  
**Amira Dzatin Nabila**

Proofreader :  
**Avinda Yuda Wati**

Ukuran :  
**xx, 175 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :  
**978-623-02-2187-3**

Cetakan Pertama :  
**Januari 2021**

Hak Cipta 2021, Pada Penulis

---

Isi diluar tanggung jawab percetakan

---

**Copyright © 2021 by Deepublish Publisher**  
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini  
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH**  
**(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: [www.deepublish.co.id](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto:cs@deepublish.co.id)

## PRAKATA

Mesin 5 sumbu hadir untuk menjawab permasalahan yang dihadapi mesin 3 sumbu dalam melakukan pekerjaan untuk menghasilkan produk dengan bentuk yang kompleks. Tambahan dua sumbu pada mesin 5 sumbu menyebabkan pahat pada mesin ini dapat diorientasikan ke berbagai arah. Sehingga proses pemotongan dapat dilakukan meskipun bentuk produk yang ingin dihasilkan sangat rumit. Mesin ini banyak dimanfaatkan untuk membuat pola cetakan yang biasanya memiliki bentuk geometri yang sangat kompleks. Sebelum mesin ini ada, proses pembuatan pola cetakan biasanya dilakukan dengan cara memahat kayu. Sehingga kualitas pola cetakan sangat tergantung dari keterampilan pemahatnya. Selain itu, sulit untuk mendapatkan hasil dengan tingkat akurasi dan presisi yang baik. Hal ini menyebabkan mesin 5 sumbu sangat cepat berkembang dan digunakan di berbagai industri.

Selain menghadirkan berbagai manfaat, penambahan 2 sumbu pada mesin 5 sumbu menyebabkan pergerakan pahat menjadi lebih rumit. Hal ini memberi tantangan tersendiri dalam melakukan perhitungan dan simulasi proses pemotongan. Dampaknya adalah optimasi proses pemesinan menjadi lebih sulit dilakukan. Kondisi ini menarik perhatian banyak peneliti untuk terlibat dalam menyelesaikan persoalan tersebut.

Buku ini disusun dengan tujuan untuk menyajikan informasi yang lengkap terkait proses optimasi yang dilakukan pada proses pemesinan freis 5 sumbu. Pembahasan pada **BAB 1** dimulai dengan memberi gambaran yang utuh tentang sejarah munculnya mesin 5 sumbu dan perkembangan teknologi yang mendukung mesin ini. Kemajuan teknologi mesin CNC

menyebabkan proses pemesinan berubah menjadi mesin serbaguna yang akurat dan terjangkau. Teknologi lain yang sangat berpengaruh dalam perkembangan mesin 5 sumbu adalah munculnya program CAD/CAM. Program CAD membuat rancangan produk dapat dikerjakan secara digital, dapat dimodifikasi, dan dapat dibuat menjadi bentuk 2D atau 3D. Sedangkan program CAM memberikan kemudahan dalam hal pemilihan pahat, penentuan material dan variabel lain yang berdampak pada penentuan kondisi potong.

Pada **BAB 2** dibahas struktur kinematika mesin freis 5 sumbu. Kemampuan mesin 5 sumbu dalam melakukan gerakan yang fleksibel diuraikan dalam bagian ini. Sebagian besar mesin 5 sumbu yang beredar di pasaran memiliki tiga sumbu translasi dan dua sumbu rotasi. Lima sumbu pergerakan mesin freis tersebut dibagi atas pergerakan pahat dan pergerakan meja atau disebut juga pergerakan benda kerja. Secara kinematika, mesin 5 sumbu terdiri dari beberapa tipe tergantung dari jumlah sumbu pada pergerakan pahat dan pergerakan benda kerja.

Terdapat berbagai metode optimasi proses pemesinan yang dapat dilakukan, di mana semua metode yang ada membutuhkan informasi yang akurat tentang geometri dan volume total. Model geometri total diperoleh dari persinggungan antara pahat dan benda kerja. Terdapat beberapa pendekatan dalam menghitung bentuk geometri dan volume total, salah satunya adalah model solid seperti yang diuraikan pada **BAB 3**. Pada bagian ini diuraikan model solid menggunakan metode *boundary representative* (B-Rep). Volume material terpotong (*material removed*) dibangun oleh pembungkus yang disebut dengan amplop tersapu (*swept envelope*). Amplop tersapu dibangun dari tiga bagian, yaitu titik *egress*, titik *ingress*, dan

titik *grazing*. Pada bagian ini disajikan metode untuk memperoleh volume terpotong beserta hasil pengujian yang dilakukan.

Model solid terbukti mampu memberikan hasil perhitungan yang akurat, namun metode ini memiliki kelemahan dalam hal waktu komputasi yang panjang dan kebutuhan terhadap memori yang besar. Hal ini disebabkan karena model solid melakukan perhitungan menggunakan konsep persinggungan antara permukaan (*surface-surface intersection*), yaitu antara permukaan pahat dan permukaan benda kerja. Oleh karena itu maka banyak penelitian yang dilakukan untuk mengembangkan metode lain. Salah satunya adalah metode vektor diskrit sebagaimana yang disajikan pada **BAB 4**. Dengan metode ini maka permukaan benda kerja dibagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari susunan vektor dalam jumlah yang banyak. Terdapat dua metode yang paling banyak digunakan pada model diskrit, yaitu model *Discrete Normal Vector* (DNV) dan model *Discrete Vertical Vector* (DVV). Metode ini terbukti bisa melakukan perhitungan geometri total dengan lebih efisien dibanding model solid.

Metode vektor diskrit terbukti mampu menjawab kelemahan model solid dalam hal waktu komputasi. Hal ini disebabkan karena persinggungan antara pahat dan benda kerja dihitung menggunakan prinsip perpotongan antara permukaan dan vektor (*surface-vector intersection*). Namun kelemahan metode vektor diskrit dibanding dengan model solid adalah tingkat akurasi yang lebih rendah. Kelemahan ini dapat diatasi dengan memperkecil jarak antara vektor. Hanya saja hal ini menyebabkan jumlah vektor diskrit yang digunakan untuk merepresentasikan permukaan menjadi lebih banyak. Penambahan jumlah vektor diskrit berdampak terhadap waktu komputasi yang semakin panjang.

Oleh karena itu maka terdapat metode analitis yang dikembangkan untuk menghitung geometri tatal sebagaimana yang disajikan pada BAB 5 dan BAB 6. Pada **BAB 5** dikembangkan metode yang disebut dengan *Analytical Boundary Simulation (ABS)* untuk proses pemesinan freis semihalus (*semi-finish milling*), sedangkan pada **BAB 6** untuk pemesinan freis halus (*finish milling*). Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil perhitungan menggunakan metode ini sangat akurat dan waktu komputasi yang dibutuhkan juga terbukti sangat singkat.

Sebagai penutup dari buku ini maka pada BAB 7 disajikan metode optimasi dengan konsep penjadwalan laju pemakanan (*federate scheduling*). Optimasi laju pemakanan ini dapat dilakukan dengan dua pendekatan, pertama adalah berdasarkan volume terpotong, dan kedua adalah berdasarkan gaya potong (*cutting force*). Dari banyak penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa optimasi berdasarkan gaya potong memberi hasil yang lebih akurat dan lebih efektif.

Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan Politeknik Caltex Riau dan Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, atas dukungannya sehingga buku ini dapat diselesaikan dan diterbitkan. Untuk perbaikan ke depan, penulis sangat mengharapkan dan menyambut baik segala masukan, saran dan kritik terhadap buku ini. Semoga buku ini bisa memberi manfaat bagi para pembaca pada umumnya, dan menambah khazanah ilmu pengetahuan bidang teknik pada khususnya.

Pekanbaru, Januari 2021

Dr. Hendriko, S.T., M.Eng.

# DAFTAR ISI

PRAKATA .....	v
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>BAB 2. STRUKTUR KINEMATIKA MESIN FREIS 5</b>	
<b>SUMBU .....</b>	<b>15</b>
2.1. Diagram Rantai Kinematika .....	17
2.2. Klasifikasi Struktur Kinematika Mesin 5 Sumbu.....	19
2.3. Perhitungan Kinematika Mesin 5 Sumbu .....	25
<b>BAB 3. MODEL SOLID UNTUK MENGHITUNG</b>	
<b>GEOMETRI TATAL PADA MESIN FREIS 5</b>	
<b>SUMBU .....</b>	<b>38</b>
3.1. Menentukan Permukaan Pahat Toroidal.....	43
3.2. Menentukan Permukaan Pahat Silinder .....	49
3.3. Transformasi Sistem Koordinat dan	
Menentukan Kecepatan Titik Kontrol .....	52
3.4. Membangun Volume Terpotong.....	54
3.5. Hasil Simulasi .....	56
<b>BAB 4. METODE VEKTOR DISKRIT UNTUK</b>	
<b>MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA</b>	
<b>MESIN FREIS 5 SUMBU .....</b>	<b>59</b>
4.1. Strategi Pemodelan untuk Benda Kerja dengan	
Fitur Khusus.....	62

4.1.1. Parameter Akurasi.....	64
4.1.2. Model Benda Kerja Awal.....	66
4.1.3. Menentukan Persinggungan <i>Swept Envelope</i> dan Vektor Diskrit .....	69
4.1.4. Validasi Perpotongan Pahat dan Benda Kerja.....	71
4.1.5. Implementasi pada Bentuk Silinder .....	74
4.1.6. Implementasi pada Cetakan <i>Injection Molding</i> .....	75
<b>BAB 5. METODE ANALITIS UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA PEMESINAN SEMIHALUS 5 SUMBU.....</b>	<b>78</b>
5.1. Menentukan Sistem Koordinat dan Bentuk Pahat .....	80
5.2. Menentukan <i>LE-Point</i> .....	85
5.3. Metode Analitis untuk Pengefraisan Semihalus .....	87
5.3.1. Menentukan <i>UE-Point</i> pada Pahat Datar .....	88
5.3.2. Menentukan <i>UE-Point</i> pada Pahat Toroidal.....	92
5.3.3. Menghitung Geometri Tatal.....	99
5.3.4. Pengujian Metode Analitis pada Pengefraisan Semihalus.....	100
5.3.4.1. Implementasi dengan Pahat Datar.....	101
5.3.4.2. Implementasi dengan Pahat Toroidal .....	103
5.3.4.3. Verifikasi Model .....	105
5.3.4.4. Pengujian Waktu Komputasi .....	107

<b>BAB 6. METODE ANALITIS UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA PEMESINAN HALUS</b>	
<b>5-SUMBU .....</b>	<b>109</b>
6.1. Menentukan Bentuk Permukaan Benda Kerja .....	111
6.2. Menentukan <i>UE-Point</i> pada Pemesinan Permukaan Kompleks dengan Pahat Datar .....	113
6.2.1. Menentukan Lokasi Persinggungan pada Pahat.....	114
6.2.2. Menentukan <i>UE-Point</i> .....	115
6.2.2.1. Tahap 1: Putar Garis Proyeksi Sebesar $\theta B$ .....	116
6.2.2.2. Tahap 2: Permukaan Miring.....	117
6.2.2.3. Tahap 3: Rotasi Garis Terputar dengan $\theta A$ .....	119
6.3. Implementasi Metode yang Dikembangkan .....	121
6.4. Menentukan <i>UE-Point</i> pada Pemesinan Permukaan Kompleks dengan Pahat Toroidal .....	126
6.4.1. Menentukan Lokasi Titik Persinggungan .....	127
6.4.2. Menentukan <i>UE-Point</i> .....	128
6.4.2.1. Memutar Garis Terputar Menggunakan $\theta 2$ .....	129
6.4.2.2. Menghitung Sudut Toroidal <i>UE-Point</i> .....	131
6.4.2.3. <i>UE-Point</i> untuk Setiap Sudut Persinggungan .....	133
6.4.3. Implentasi dan Pembahasan.....	135
<b>BAB 7. OPTIMASI PROSES PEMESINAN PADA MESIN 5 SUMBU .....</b>	<b>139</b>
7.1. Optimasi Laju Pemakanan Secara Online.....	144
7.2. Optimasi Laju Pemakanan Secara <i>Offline</i> .....	146

7.2.1. Strategi Optimasi Berbasis Volume Terpotong dan Geometri Tatal .....	147
7.2.1.1. Optimasi Laju Pemakanan Berdasarkan Volume Terpotong .....	148
7.2.1.2. Optimasi Laju Pemakanan Berdasarkan Geometri Tatal .....	150
7.2.2. Strategi Optimasi Berbasis Gaya Potong .....	152
7.2.2.1. Metode untuk Mengidentifikasi Koefisien Gaya Potong .....	153
7.2.2.2. Implementasi Penghitungan Koefisien Gaya Potong .....	159
7.2.2.3. Prediksi Gaya Potong Pada Mesin Freis 5 Sumbu .....	161
7.2.2.4. Optimasi Laju Pemakanan Berbasis Gaya Potong .....	165
7.2.3. Perbandingan Metode Optimasi Berbasis Volume dan Berbasis Gaya Potong .....	166
DAFTAR PUSTAKA .....	169
TENTANG PENULIS .....	174

## DAFTAR TABEL

Tabel 4-1	Waktu Simulasi Menggunakan Metode Hibrid ( $\varepsilon = 0,001$ dan $\delta = 0,173$ ).....	75
Tabel 4-2	Waktu Simulasi untuk Metode Hibrid ( $\varepsilon = 0,005$ dan $\delta = 0,387$ ) .....	76
Tabel 5-1	Cara untuk Mengidentifikasi dan Menghitung <i>UE-Point</i> pada Pahat Datar .....	91
Tabel 5-2	Cara untuk Mengidentifikasi dan Menghitung <i>UE-Point</i> pada Pahat Toroidal.....	96
Tabel 6-1	Variabel untuk Sudut Persinggungan 0, 90, dan 180 .....	128

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1	Mesin CNC Hasil Invensi John T Parsons Frank L Stulen Tahun 1952 .....	4
Gambar 1-2	Garis Waktu Evolusi Elektronika dan Komputer yang Mendukung Pertumbuhan CNC hingga Tahun 1980 .....	6
Gambar 1-3	Mesin Freis 3 Sumbu Hasil Invensi MIT dan Cincinnati Milling Machine Company.....	7
Gambar 1-4	Mesin Variax .....	9
Gambar 1-5	Rancangan Mobil Pertama Menggunakan DAC-1 .....	10
Gambar 1-6	Patrick J. Hanratty Bekerja Menggunakan Computer Aided Design of Integrated Circuits (CADIC) tahun 1967.....	12
Gambar 2-1	Pergerakan Mesin 5 Sumbu [2] .....	16
Gambar 2-2	Mesin 5 Sumbu .....	17
Gambar 2-3	Diagram Rantai Kinematika .....	19
Gambar 2-4	Mesin Tipe XYZ A'B' .....	20
Gambar 2-5	Konfigurasi Sumbu Penggerak Meja dan Pahat.....	24
Gambar 2-6	Sistem Koordinat a) Aturan Tangan Kiri, b) Aturan Tangan Kanan .....	26
Gambar 2-7	a) Mesin 2/0, b) Sistem Koordinat Sumbu .....	28
Gambar 2-8	a) Mesin 1/1, b) Sistem Koordinat Sumbu .....	31
Gambar 2-9	a) Mesin 2/0, b) Sistem Koordinat Sumbu .....	35
Gambar 3-1	Alur Proses Pemesinan Freis Virtual.....	39
Gambar 3-2	Diagram Alir Proses Ekstraksi Bidang Kontak.....	40

Gambar 3-3	Bentuk Amplop Tersapu ( <i>Swept Envelope</i> ) Pahat Bola.....	41
Gambar 3-4	a) Sistem Koordinat Acuan, b) Koordinat dan Titik pada Pergerakan Mesin 5 Sumbu.....	44
Gambar 3-5	Mesin Freis 5 Sumbu Mikromat Hexa 6X.....	46
Gambar 3-6	Menentukan Interpolasi <i>ut</i> untuk Pahat Toroidal .....	50
Gambar 3-7	Profil Tersapu Toroidal Cutter 2D untuk: a) $\omega = 0$ , dan b) $\omega = (0.1, 0, 0)$ .....	56
Gambar 3-8	Menentukan Interpolasi <i>ut</i> untuk Pahat .....	58
Gambar 4-1	Representasi Permukaan Benda Kerja dengan Metode a) Vektor Normal dan b) Vektor Vertikal .....	60
Gambar 4-2	Metode Vektor Diskrit, a) Bentuk dan Fitur Produk, b) Model DVV, c) Model DNV, d) Konsep Hibrid .....	61
Gambar 4-3	Skema Model a) DNV dan b) DVV .....	63
Gambar 4-4	Analisis Akurasi, a) Akurasi Representasi, dan b) Akurasi Simulasi .....	66
Gambar 4-5	Tipe Benda Kerja Awal, a) Tipe Casting, dan b) Tipe Blok.....	67
Gambar 4-6	Lokalisasi Vektor pada Mesin 5 Sumbu .....	68
Gambar 4-7	Representasi Pahat, a) Kurva Siluet, dan b) <i>Swept Envelope</i> .....	70
Gambar 4-8	Persinggungan <i>Swept Envelope</i> dan Vektor .....	71
Gambar 4-9	Validasi Perpotongan Antara <i>Swept Envelope</i> dan Vektor.....	72
Gambar 4-10	Kondisi Ketika $\lambda$ Bernilai Hingga, a) Proses Normal, b) Proses Abnormal, c) Kondisi	

	Pemotongan Sempurna, d) Suplemen Model DVV.....	73
Gambar 4-11	Implementasi Model, a) Permukaan Setengah Silinder, b) Waktu Komputasi Model DVV Murni, c) Waktu Komputasi Waktu DNV Murni .....	74
Gambar 4-12	a) Rancangan Produk, b) Pemesinan Kasar Menggunakan DVV Murni, c) Pemesinan Akhir Model Hibrid dan, d) Sisi yang Menggunakan DNV.....	77
Gambar 5-1	a) Geometri Tatal, b) Tipe Permukaan Benda Kerja untuk Pemesinan Freis <i>Semi-Finish</i> .....	79
Gambar 5-2	Sistem Koordinat, a) Tiga Sistem Koordinat, b) Orientasi Pahat Relatif Terhadap WCS, dan c) Sudut Persinggungan ( $\varphi$ ) dan Sudut Persinggungan Awal ( $\varepsilon$ ).....	81
Gambar 5-3	Parameter Geometri Pahat, a) Pahat Datar, dan b) Pahat Toroidal .....	83
Gambar 5-4	Dampak Sudut Inklinasi Terhadap <i>LE-point</i> , a) Pahat Datar dan, b) Pahat Toroidal .....	86
Gambar 5-5	Dua lokasi <i>UE-point</i> pada Pahat Datar, a) Dinding Benda Kerja, dan b) Bagian Atas Benda Kerja .....	89
Gambar 5-6	Lokasi <i>UE-Point</i> Ketika $z_A < z_B$ .....	90
Gambar 5-7	Dua Lokasi <i>UE-Point</i> pada Pahat Toroidal.....	93
Gambar 5-8	Beberapa Kondisi Pemotongan yang Mungkin Terjadi Ketika Menggunakan Pahat Toroidal.....	96
Gambar 5-9	a) Model Produk dan Benda Kerja Pengujian untuk Pahat Datar, b) Bentuk Tatal untuk Satu Lintasan Pahat, c) Panjang Tatal untuk Satu	

	Lintasan Pahat, d) Bentuk dan Panjang Total untuk CC-33 dan CC-46 dengan $\varphi \in \{0, 180\}$ .....	100
Gambar 5-10	a) Model Produk dan Benda Kerja Pengujian untuk Pahat Toroidal, b) Bentuk Total untuk Satu Lintasan Pahat, c) Panjang Total untuk Satu Lintasan Pahat, d) Bentuk dan Panjang Total untuk CC-9 dan CC-37 dengan $\varphi \in \{0, 180\}$ .....	102
Gambar 5-11	Efek Sudut Inklinasi Terhadap Sudut Toroidal LE-Point .....	104
Gambar 5-12	Verifikasi Model, a) Model Tes 1, b) Verifikasi Menggunakan Siemens-NX, c) Model Tes 2 .....	105
Gambar 5-13	Perbandingan Waktu Komputasi antara ABS dan Z-Mapping.....	107
Gambar 6-1	Representasi Bentuk Permukaan Benda Kerja, a) Distribusi Vektor Normal, b) Orientasi Vektor pada WCS, c) Kemungkinan Bentuk Kombinasi Benda Kerja.....	110
Gambar 6-2	Representasi Bentuk Benda Kerja, a) Tampak Atas Benda Kerja, b) Metode untuk Menghitung Radius.....	112
Gambar 6-3	Garis Proyeksi dan Lokasi UE-point.....	114
Gambar 6-4	Rotasi Garis Proyeksi pada $Sx$ , a) Permukaan Cembung, b) Permukaan Cekung, c) Permukaan Lereng, dan d) Permukaan Miring.....	116
Gambar 6-5	Rotasi Garis Proyeksi Terputar pada $Si$ , a) Permukaan Cembung, b) Permukaan Cekung.....	118
Gambar 6-6	Titik Persinggungan Pada Dinding Permukaan Benda Kerja.....	120

Gambar 6-7	Desain Permukaan Benda Kerja untuk Pengujian dan Bentuk Tatal yang Dihasilkan dari Program Simulasi.....	121
Gambar 6-8	Panjang Tatal untuk Satu Lintasan Pahat Pada Masing-Masing Tes .....	122
Gambar 6-9	Bentuk dan Panjang Tatal pada $\varphi \in \{0, 180\}$ untuk Beberapa <i>CC-point</i> .....	123
Gambar 6-10	Hasil verifikasi, a) metode mengukur tatal pada Siemens-NX, b) c) dan d) error pada $\varphi \in [0 : 10 : 180]$ .....	124
Gambar 6-11	Garis Proyeksi Pada Pahat Toroidal.....	125
Gambar 6-12	Putaran Garis Proyeksi pada <i>Si</i> Ketika <i>UE-point</i> pada Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Kurva Benda Kerja .....	130
Gambar 6-13	Titik Persinggungan Antara Permukaan Toroidal Pahat dan Permukaan Melengkung Benda Kerja, a) $\theta 2$ Positif, b) $\theta 2$ Negatif .....	131
Gambar 6-14	Titik Persinggungan antara Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Datar Benda Kerja, a) Ketika $\theta 2$ Positif, b) Ketika $\theta 2$ Negatif.....	132
Gambar 6-15	Titik Persinggungan antara Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Miring Benda Kerja, a) Ketika $\theta 2$ Positif, b) Ketika $\theta 2$ Negatif.....	133
Gambar 6-16	<i>UE-point</i> pada $\varphi \{0, 90, 180\}$ .....	134
Gambar 6-17	Model Pengujian, a, b, c, d) Bentuk Tatal dan e, f, g, h) Panjang Tatal .....	135
Gambar 6-18	Error pada Setiap <i>CC-Point</i> .....	136
Gambar 6-19	Bentuk Geometri Tatal, Panjang Tatal dan Error untuk $\in \{0, 180\}$ .....	137
Gambar 7-1	Diagram Proses Optimasi dan Simulasi [17].....	140

Gambar 7-2	Laju Pemakanan Berbeda untuk Beban Pahat Berbeda [20] .....	143
Gambar 7-3	Optimisasi Laju Pemakanan Menggunakan B-rep, a) Gerakan Awak dan Akhir Pahat, b) Volume Terpotong Per Blok, c) Permukaan Akhir, d) Volume Pahat Tersapu [20] .....	147
Gambar 7-4	Laju Pemakanan Orisinal dan Optimasi.....	148
Gambar 7-5	Optimasi Laju Pemakanan dengan Berbagai Acuan Volume Terpotong .....	149
Gambar 7-6	Perubahan Volume untuk Optimasi Lajur Pemakanan dengan Berbagai Volume Acuan .....	150
Gambar 7-7	Optimasi Pemesinan pada Mesin Freis 5 Sumbu, a) Penjadwalan Laju Pemakanan, b) Luas Area Total dengan Laju Pemakanan Orisinal, c) Luas Area Total dengan Penjadwalan Laju Pemakanan. ....	152
Gambar 7-8	Arah Komponen Gaya Potong Pada Sisi Pahat.....	154
Gambar 7-9	Contoh Data Polinomial, a) Laju Pemakanan 0,3 mm/Gigi dan Kedalaman Pemakanan 2 mm, b) Laju Pemakanan 0,1 mm dan Kedalaman Pemakanan 10 mm .....	157
Gambar 7-10	Pengaturan Alat Pada Mesin 5 Sumbu .....	159
Gambar 7-11	Koefisien Data Hasil Eksperimen dan Data yang Telah Dihaluskan, a) Koefisien Potong, b) Koefisien Sisi .....	160
Gambar 7-12	Pengujian Gaya Potong Semihalus, a) Model Tes, b) Panjang Tatal, c) Gaya Potong Pada Sumbu-x ( $F_x$ ), d) Gaya Potong Pada Sumbu-y ( $F_y$ ), e) Gaya Potong Pada Sumbu-z ( $F_z$ ) .....	162

Gambar 7-13	Pengujian Gaya Potong Permesinan Halus, a) Model Tes, b) Panjang Tatal, c) Gaya Potong Pada Sumbu-x ( $F_x$ ), d) Gaya Potong pada Sumbu-y ( $F_y$ ), e) Gaya Potong pada Sumbu-z ( $F_z$ ).....	164
Gambar 7-14	a) Perbandingan gaya potong hasil perhitungan dan pengukuran, b) NC sebelum dan sesudah optimasi.....	167

# BAB 1.

## PENDAHULUAN

Penggunaan mesin *Computer Numerically Controlled* (CNC) untuk memproduksi komponen yang kompleks sudah sangat masif saat ini. Mesin CNC banyak digunakan untuk membuat berbagai jenis produk, terutama untuk membuat cetakan. Selain itu banyak juga dimanfaatkan untuk memproduksi komponen khusus seperti sudu turbin.

Kebutuhan untuk menghasilkan produk yang kompleks menyebabkan mesin CNC berkembang dari hanya sekadar 3 sumbu menjadi 5 sumbu. Mesin 5 sumbu memiliki keunggulan dibanding dengan mesin 3 sumbu dalam menghasilkan produk yang rumit. Selain waktu proses pemesinan lebih cepat, mesin 5 sumbu juga mampu menghasilkan produk dengan akurasi yang lebih tinggi. Mesin 5 sumbu tidak hanya mampu mengendalikan posisi pahat, namun orientasi sumbu pahat juga dapat diatur.

Proses pemesinan berlangsung sangat sulit sebelum *controller* mulai digunakan pada mesin-mesin produksi seperti pada mesin bubut dan mesin freis. Operator mengendalikan pergerakan pahat secara manual menggunakan tuas, roda kemudi, atau *cam plate*. Agar mampu melakukan pergerakan yang fleksibel, mesin multi sumbu dirancang menggunakan lebih dari 12 *cam plate*. *Cam plate* berfungsi untuk mengendalikan pergerakan pahat, meja, dan

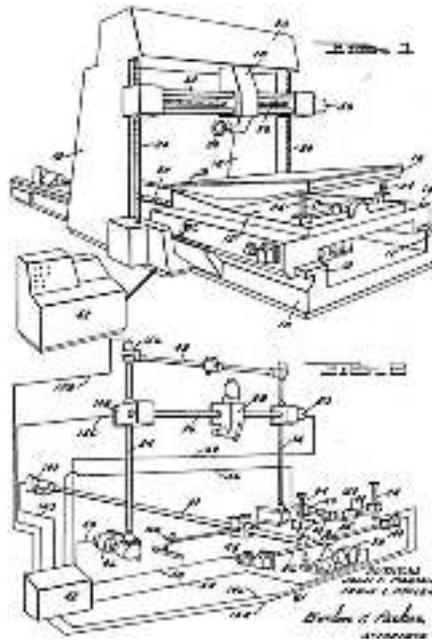
berbagai jenis *fixture* yang dijepit maupun tidak dijepit. Mesin ini sangat rumit dan membutuhkan waktu yang lama untuk proses *set-up*. Meski demikian, mesin ini cocok digunakan untuk produksi massal. Kondisi mesin yang rumit ini menyebabkan kemampuannya dalam menghasilkan produk dengan toleransi yang kecil secara akurat menjadi sangat terbatas. Mesin *numerically controlled* (NC) pertama mulai dikembangkan pada sekitar tahun 1949 oleh John T. Parsons dan Frank Stulen. Parsons merupakan pemilik dari Parson Corporation. Mereka mengembangkan mesin ini ketika sedang mengerjakan proyek pembuatan komponen helikopter. Model pertama mesin NC seperti yang terlihat pada Gambar 1-1 diperkenalkan pada tahun 1952. Adanya kebutuhan akan komponen dengan bentuk yang rumit dan akurasi yang tinggi menjadi pemicu ditemukannya mesin tersebut.

Mesin NC pertama tidak dilengkapi dengan memori internal sehingga masih sulit untuk melakukan *set-up* dan mengoperasikannya. Namun teknologi ini menyebabkan proses produksi massal berlangsung semakin mudah. Hanya saja harganya pada saat itu sangat mahal sehingga hanya industri besar yang mampu membeli mesin NC. Proses pemrograman pada mesin NC membutuhkan waktu yang panjang dan rumit sehingga kesalahan sering terjadi. Oleh karena itu maka industri penghasil mesin mengembangkan memori internal dan menambahkan sistem kendali. Dengan adanya memori internal membuat mesin dapat mengeksekusi program dengan proses logika bercabang dan melakukan pengulangan (*looping*). Program juga dapat disimpan dan digunakan kembali untuk jenis pekerjaan lain.

Fitur teknologi NC pada mesin produksi terus berkembang dengan penambahan teknologi pengendali menggunakan komputer (*computer controls*). Mesin NC dengan cepat berkembang

menjadi *Computer Numerical Control* (CNC). Teknologi baru ini sangat populer dan didukung dengan berbagai jenis bahasa pemrograman. Masing-masing perusahaan mesin CNC turut mengembangkan bahasa pemrograman sendiri, seperti Fanuc, Acramatic, Heidennein, Siemens, dan Mazatrol. Namun kondisi ini menyebabkan timbulnya masalah baru. Sebagai contoh, sebuah industri yang memiliki mesin CNC dengan berbagai merek terpaksa harus menjalankan mesin dengan berbagai bahasa pemrograman yang berbeda-beda. Kondisi ini menyulitkan ketika sebuah mesin sedang bermasalah maka program tidak dapat digunakan pada mesin lain sehingga program harus disusun ulang.

Perkembangan berikutnya adalah munculnya perangkat lunak yang bernama *Computer Aided Design* (CAD) dan *Computer Aided Manufacturing* (CAM). Awalnya perangkat lunak ini dikenalkan oleh perusahaan yang sama dengan perusahaan yang mengembangkan kontroler. Namun setelah itu masing-masing perusahaan CNC mengembangkan perangkat lunak CAD/CAM sendiri. Munculnya perangkat lunak ini merupakan lompatan teknologi yang tinggi. Hal ini menyebabkan desainer dapat merancang produk mereka melalui program CAD. Selanjutnya rancangan tersebut digunakan untuk menghasilkan lintasan pahat (*toolpath*) menggunakan sistem CAM. Kemudian lintasan pahat tersebut diterjemahkan dengan cepat menjadi beberapa pilihan bahasa G, tergantung jenis prosesor yang digunakan. Perkembangan teknologi ini menyebabkan CAM dapat digunakan untuk membuat program yang bisa digunakan pada berbagai tipe mesin CNC. Hal ini menyebabkan teknologi CAD/CAM menjadi serba guna dan mudah digunakan pada berbagai proses operasi.



Gambar 1-1 Mesin CNC Hasil Invensi John T Parsons Frank L Stulen Tahun 1952

Kemajuan teknologi menyebabkan mesin CNC tidak lagi menjadi hal yang luar biasa. Secara perlahan mesin CNC menjadi teknologi biasa yang tidak hanya digunakan untuk produksi massal, namun berubah menjadi mesin serbaguna yang akurat dan terjangkau. Semakin terjangkaunya harga CNC disebabkan oleh turunnya harga komputer pada sekitar tahun tujuh puluhan.

Mesin multi sumbu mengalami perkembangan yang hampir sama dengan perkembangan mesin CNC lainnya. Hanya saja karena lebih rumit, proses perkembangan teknologi ini relatif lebih lambat. Penyebabnya adalah harganya yang tinggi dan biaya perawatannya yang lebih mahal. Selain itu proses pemrogramannya juga jauh lebih rumit. Umumnya hanya

perusahaan pesawat terbang yang membutuhkan dan mampu membelinya. Selain itu perusahaan pesawat terbang juga memiliki personil yang mampu mengoperasikannya. Untuk mengatasi kerumitan dalam proses pemrograman mesin multi sumbu, banyak penelitian yang dilakukan untuk menghasilkan peranti lunak CAD/CAM. Peranti lunak terus berkembang untuk mengatasi keterbatasan yang dimiliki perangkat keras.

Karena kemampuannya untuk menghasilkan produk yang sangat kompleks, penjualan mesin ini diawasi oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat. Yang dikhawatirkan otoritas keamanan adalah mesin ini disalahgunakan untuk menghasilkan senjata atau peralatan berbahaya lainnya. Oleh karena itu maka hanya institusi terpercaya yang diizinkan untuk memiliki mesin ini. Kebijakan pengawasan ketat ini berlangsung hingga tahun 2009.

Saat ini telah banyak pengembang mesin yang menawarkan berbagai jenis mesin CNC multisumbu dengan beragam konfigurasi, kualitas dan harga. Hal ini sejalan dengan semakin terjangkaunya harga komputer, dan ditambah dengan kemampuan CAD/CAM yang semakin baik. Sistem CAD/CAM mampu menghasilkan strategi pemesinan dengan kendali pahat yang akurat dan pilihan *post processor* yang beragam. Saat ini mesin CNC multi sumbu menjadi mesin yang umum. Banyak kampus yang telah memilikinya dan memasukan kompetensi dalam pengoperasian mesin ini dalam kurikulum. Hal ini didorong oleh tingginya kebutuhan operator yang mampu mengoperasikan mesin CNC multi sumbu.

Kebanyakan perusahaan produsen mesin mengambil kebijakan untuk meningkatkan produksi sambil terus mengembangkan teknologi baru. Mereka meyakini bahwa mesin multi-sumbu bisa digunakan dalam persaingan usaha yang semakin ketat, terutama untuk melawan produk dari negara dengan upah

pekerja yang relatif lebih murah. Kondisi ini menyebabkan terjadinya peningkatan penjualan mesin multi-sumbu. Bahkan dalam masa puncaknya, beberapa pelanggan harus masuk daftar tunggu untuk memperoleh mesin multi sumbu yang diinginkan. Teknologi mesin multi sumbu masih akan terus berkembang.

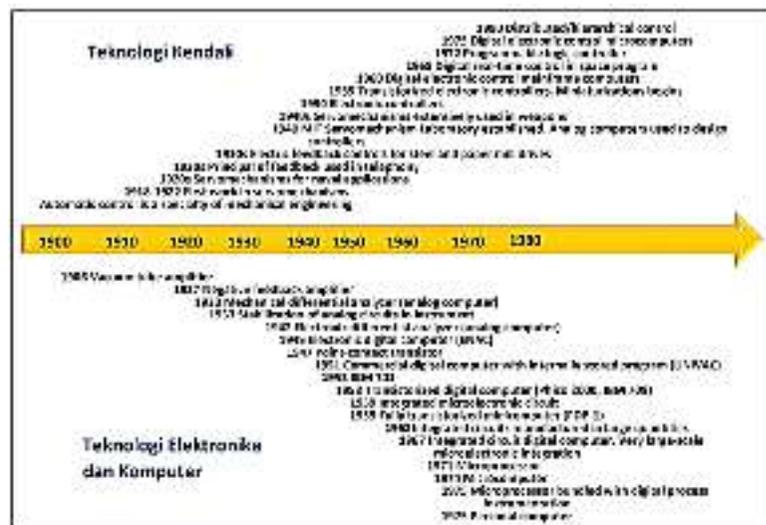
### Perkembangan Mesin CNC

Klasifikasi generasi perkembangan CNC dapat dikategorikan berdasarkan teknologi yang digunakan. Sebagian besar studi membagi perkembangan teknologi CNC dalam tiga generasi, yaitu:

Generasi I (1952) : Penggunaan *relay* dan tabung elektronik.

Generasi II (1960) : *Relay* dan tabung elektronik diganti dengan transistor.

Generasi III (1965) : Teknologi *Computerized Numerical Control* (CNC)



Gambar 1-2 Garis Waktu Evolusi Elektronika dan Komputer yang Mendukung Pertumbuhan CNC hingga Tahun 1980

Pada Generasi I dan Generasi II, kontroler menerima instruksi melalui program yang berisi karakter alfanumerik. Melalui perintah ini kontroler mengatur pergerakan mesin. Program dikerjakan menggunakan komputer yang sangat sederhana dan kemudian dipindahkan ke kontroler menggunakan pita kaset. Pada saat itu perekam pita kaset dan *floppy disk* digunakan untuk menyimpan dan merekam program. Selanjutnya kontroler memiliki sistem pembaca kaset untuk membaca program.

### Tahapan Bersejarah dan Evolusi Mesin NC/CNC

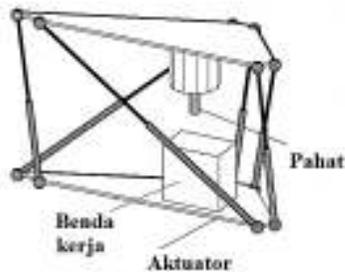
Perkembangan teknologi mesin CNC sangat dipengaruhi oleh perkembangan komponen dan aksesoris pendukungnya. Perkembangan komponen dan aksesoris pendukung tersebut yang membuat mesin CNC menjadi begitu kompleks, mudah dioperasikan, dan harganya terjangkau.

1950 : Laboratorium Mekanisme Servo Massachusetts Institute of Technology (MIT) mengembangkan mesin NC *milling*.



Gambar 1-3 Mesin Freis 3 Sumbu Hasil Invensi MIT dan Cincinnati Milling Machine Company

- 1952 : Parson Corp. mendaftarkan paten dengan judul "*Motor Controlled Apparatus for Positioning Machine Tool*" pada tanggal 5 Mei 1952. Pada tahun yang sama MIT bersama dengan Cincinnati Milling Machine Company meluncurkan mesin freis NC dengan 3 sumbu seperti yang terlihat pada Gambar 1-3.
- 1953 : Numericord mulai dikembangkan secara kolaborasi antara Giddings dan Lewis Machine Tool Co (G&L), MIT, dan General Electric Co. Numericord merupakan sistem kendali digital yang menggunakan sistem kaset magnetik.
- 1955 : IBM mengembangkan *automatic tool changer*. Douglas Ross adalah seorang pioner dalam upaya pengembangan program otomatis mesin NC. Ross adalah seorang ahli matematika dari MIT yang kemudian bergabung dengan Laboratorium Mekanisme Servo dalam pengembangan sistem komputer untuk mengolah data dengan kecepatan tinggi. Penelitian mereka bermuara pada pengembangan *Automatically Programmed Tool (APT)*.
- 1956 : Laboratorium Mekanisme Servo MIT melahirkan *G-code* yang merupakan bahasa pemrograman NC. *G-code* berfungsi untuk memerintahkan mesin dalam melakukan pergerakan. Instruksi dikirim melalui kontroler yang kemudian memerintahkan motor untuk bergerak dengan kecepatan tertentu pada lintasan yang harus dilalui.
- 1957 : Setahun setelah perangkat lunak CAM dikembangkan, sistem pemrograman NC bernama Pronto diluncurkan oleh Patrick J. Hanratty.
- 1957 : G&L memperkenalkan mesin NC 5 sumbu pertama yang diberi nama Variax seperti yang ditampilkan pada Gambar 1-4.



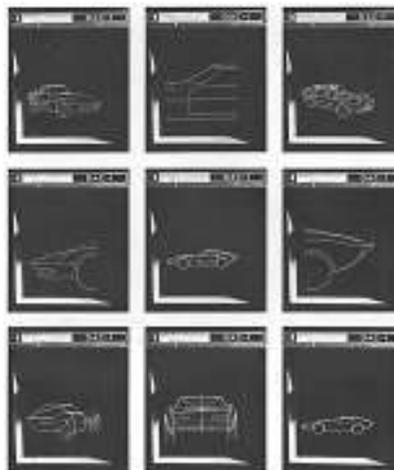
Gambar 1-4 Mesin Variax

- 1958 : Mesin NC yang dilengkapi dengan sistem *automatic tool changer* dan *athomatic work position*. Mesin ini dihasilkan oleh perusahaan bernama Kearney & Trecker Corp., Milwaukee dengan nama produk Milwaukee-Matic II.
- 1959 : General Motor (GM) mulai bekerja menggunakan sistem grafis CAD yang kemudian dikenal sebagai *Design Augmented by Computer* (DAC-1). Rancangan pertama menggunakan perangkat DAC-1 dapat dilihat pada Gambar 1-5
- 1960 : Kontroler dengan teknologi transistor pertama diperkenalkan.
- 1963 : DAC-1 mulai diproduksi dan dipasarkan secara komersial.
- 1965 : Perangkat CAD mampu membuat rancangan produk berbentuk kompleks.
- 1967 : Penggunaan sirkuit terintegrasi (IC) pada mesin NC mengurangi 90 persen penggunaan komponen elektronik dan 80 persen kabel. Penggunaan IC dianggap sebagai salah satu terobosan besar dalam evolusi mesin CNC.
- 1968 : *Machining centre* pertama kali dihasilkan oleh sebuah pabrik mesin yang bernama Kearney dan Trecker.
- 1970 : Mesin CNC untuk pertama kali dikembangkan. Dua faktor penting yang memberi dampak besar terhadap laju

perkembangan sistem NC adalah penggunaan sirkuit terintegrasi dan perkembangan komputer yang semakin berukuran kecil namun mampu melakukan berbagai fungsi.

- 1972 : Pengembangan besar dilakukan pada mesin yang terintegrasi dengan sistem CAD/CAM. Pengembangan CAD/CAM membuat CNC dapat melakukan beberapa pekerjaan dalam satu waktu sehingga meningkatkan produktivitas mesin berlipat ganda.
- 1976 : Sistem CAD/CAM 3D diperkenalkan.
- 1980 : Aplikasi komputer berbasis grafis dikembangkan
- 1997 : PC Window berbasis pada *open modular architecture control* (OMAC) diperkenalkan untuk menggantikan *firmware controller*.

Saat ini sulit membayangkan perusahaan manufaktur tanpa sistem CAD / CAM yang memiliki kemampuan untuk mentransfer data digital ke peralatan mesin CNC.



Gambar 1-5 Rancangan Mobil Pertama Menggunakan DAC-1

## Perkembangan Program CAD/CAM

Antara komputer dan mesin CNC memiliki hubungan yang sangat mendasar dan tidak dapat dipisahkan. Program CAD membuat rancangan produk dapat dikerjakan secara digital, dapat dimodifikasi, dan dapat dibuat ke dalam bentuk 2D atau 3D. Sedangkan program CAM memberikan kemudahan dalam hal pemilihan pahat, penentuan material dan variabel lain yang berdampak pada penentuan kondisi potong. Program CAM menggunakan model yang dirancang menggunakan CAD untuk menentukan pergerakan pahat dalam memotong material. Penentuan gerakan pahat ini disebut dengan lintasan pahat. Lintasan pahat dihasilkan secara otomatis oleh CAM dengan mempertimbangkan efisiensi secara maksimum. Bahkan saat ini program CAM mampu menampilkan simulasi bagaimana proses pemotongan berlangsung berdasarkan kondisi dan variabel pemotongan yang telah ditentukan.

Pengembangan program CAD modern dimulai pada tahun 1957 di mana program bernama Pronto diluncurkan. Pronto dikembangkan oleh seorang saintis komputer bernama Patrick J. Hanratty. Dia juga mengembangkan sebuah program desain grafis interaktif yang bernama ADAM. Analisis industri dari University of California Irvine menyebutkan bahwa 70 persen dari semua program CAD/CAM mekanik 3D yang ada saat ini menggunakan kode asli dari Patrick J. Hanratty. Dengan peran besar yang diberikannya dalam pengembangan program CAD/CAM, maka Patrick J. Hanratty digelari sebagai "ayah" CAD/CAM. Ivan Sutherland selanjutnya mengembangkan program yang telah dibuat oleh Hanratty dan menghasilkan program Sketchpad di tahun 1960. Program ini menggunakan *Graphical User Interface (GUI)* secara total.



Gambar 1-6 Patrick J. Hanratty Bekerja Menggunakan Computer Aided Design of Integrated Circuits (CADIC) tahun 1967

Perkembangan CAD/CAM berlanjut di mana Autodesk AutoCAD mulai diperkenalkan pada tahun 1982. Program ini adalah program CAD 2D pertama yang dibuat khusus pada komputer pribadi, bukan pada komputer *mainframe*. Pada tahun 1994 AutoCAD R13 dikembangkan sehingga kompatibel dengan desain 3D. Kemudian SolidWorks diluncurkan pada tahun 1995 dengan tujuan agar desain CAD dapat diakses lebih mudah oleh masyarakat luas. Berikutnya Autodesk meluncurkan produk baru lagi yang bernama Inventor. Inventor yang diluncurkan pada tahun 1999 mampu bekerja lebih intuitif.

Mustahil untuk berbicara tentang evolusi mesin CNC tanpa mempertimbangkan kontribusi para pengembang program komputer bidang desain grafis. Peran mereka sangat signifikan dalam mengubah pengoperasian mesin CNC yang sangat rumit menjadi jauh lebih mudah. Bahkan Autodesk melalui produknya bernama Fusion 360 ditawarkan secara gratis untuk program pembelajaran pada institusi pendidikan. Program ini adalah program CAD, CAM, CAE 3D yang terintegrasi dalam proses pengembangan produk yang dapat digunakan pada PC, Mac, maupun perangkat seluler.

## Sejarah Singkat Mesin 5 Sumbu

Industri manufaktur di dunia akan melakukan berbagai upaya untuk dapat bertahan dalam persaingan usaha yang begitu ketat. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan terus menerapkan teknologi baru yang berkembang dengan sangat cepat. Salah satu teknologi yang menjadi bagian penting dalam upaya menghasilkan produk berkualitas adalah mesin freis 5 sumbu.

Penjualan mesin freis 5 sumbu terus berkembang dari tahun ke tahun dan permintaannya terus tumbuh. Pada tahun 2018 terjadi pertumbuhan permintaan sebesar 7%. Kemampuan mesin ini dalam menghasilkan produk dengan geometri yang kompleks dengan cepat dan akurat menyebabkannya menjadi sangat populer. Meskipun tingkat kompleksitasnya membuat khawatir bagi sebagian orang, namun potensi ekonomi yang mampu dihasilkannya telah menggoda banyak industri untuk menggunakannya.

Untuk memahami mesin 5 sumbu maka penting untuk mengetahui sejarah perkembangannya. Sejarah tentang pemesinan lima sumbu telah ditulis oleh Golden E. Herrin pada sebuah artikel yang diterbitkan oleh majalah *Modern Machine Shop* tahun 1995. Sedikit mengejutkan ternyata mesin 5 sumbu telah ada bahkan sebelum dikembangkannya mesin NC. Hanya saja sistem yang digunakan pada saat itu masih sangat sederhana dan manual.

Mesin 5 sumbu dengan teknologi NC pertama diperkenalkan pada tahun 1957 oleh Giddings dan Lewis Machine Tool Co. Kemudian Angkatan Udara Amerika Serikat menyepakati perjanjian dengan Cincinnati Milacron untuk membuat mesin 5 sumbu vertikal di tahun 1958. Ketika ide untuk pengembangan mesin ini diluncurkan, banyak yang memberi tanggapan bahwa ide tersebut tidak masuk akal. Sehingga mesin tersebut mendapat julukan "Mesin Ganja (Opium Mill)". Julukan

itu diberikan karena canggihnya teknologi tersebut pada saat itu. Meskipun terkesan terlalu berlebihan, namun ide pengembangan mesin 5 sumbu sangat realitis. Hal ini berkat kemajuan perangkat keras dan perangkat lunak komputer. Perkembangan teknologi yang membuat para perancang CNC mampu menghasilkan mesin 5 sumbu sesuai yang diinginkan dengan harga yang masuk akal.

Saat perangkat lunak CAM semakin maju, pengoperasian mesin 5 sumbu menjadi lebih mudah dan lebih efisien. Dengan adanya CAM maka pabrik dapat membuat suku cadang yang rumit menggunakan mesin CNC. Kebutuhan akan keterampilan operator dalam menyusun program CNC berkurang drastis. Sistem CAM mampu meningkatkan jumlah produksi dan dalam waktu yang sama mengurangi jumlah kecelakaan mesin. Hal ini mampu meningkatkan probabilitas yang jauh lebih tinggi untuk menghasilkan produk berkualitas.

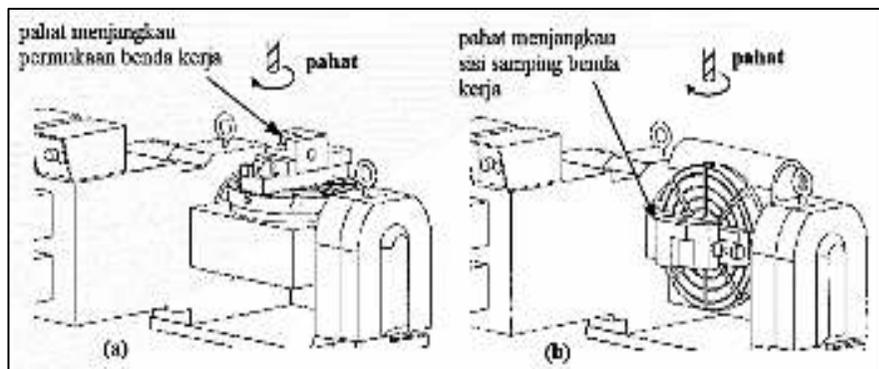
# **BAB 2.**

## **STRUKTUR KINEMATIKA MESIN FREIS 5 SUMBU**

Secara teori, mesin 5 sumbu menawarkan banyak kelebihan dibanding dengan mesin 3 sumbu. Di antara kelebihanannya adalah proses pemakanan lebih cepat, kualitas permukaan menjadi lebih halus, dan mengurangi proses akhir secara manual. Vicker dan Quan [1] menyebutkan bahwa efisiensi sebesar 10-20 kali lipat dapat diperoleh dengan menggunakan mesin 5 sumbu dibanding mesin 3 sumbu.

Ada dua pertimbangan utama dalam menggunakan mesin 5 sumbu, yaitu efisiensi dan aksesibilitas. Pada proses pembuatan cetakan, mesin 5 sumbu mampu mengurangi jumlah lintasan pahat yang dibutuhkan untuk menghasilkan produk dengan tingkat akurasi yang sama. Alasan utama menggunakan mesin 5 sumbu pada saat pembuatan impeler adalah aksesibilitas. Mesin 5 sumbu membuat pahat mampu menjangkau lokasi yang sulit dijangkau jika hanya menggunakan mesin 3 sumbu. Kemampuan ini dapat mengurangi jumlah setup yang harus dilakukan sebagaimana yang dilakukan oleh mesin 3 sumbu. Contoh sederhana disajikan pada Gambar 2-1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa mesin 5 sumbu mampu melakukan pemakanan pada sisi atas maupun sisi samping benda kerja tanpa harus melepas benda kerja terlebih dahulu. Untuk melakukan hal tersebut cukup dengan memutar kedudukan benda kerja seperti yang terlihat pada Gambar 2-1b.

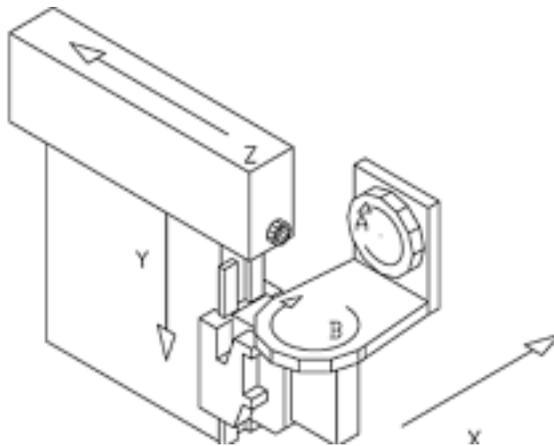
Mesin 5 sumbu memberikan manfaat yang sangat signifikan pada pemesinan dengan permukaan kompleks. Pada mesin 3 sumbu, pahat bola (*ball end mill*) biasanya digunakan untuk membuat permukaan yang kompleks. Namun pemesinan menggunakan pahat ini menghasilkan sisa potongan berbentuk silindris pada permukaan benda kerja. Dan untuk menghasilkan permukaan yang kompleks, pahat bola harus melalui lintasan pahat yang sangat banyak karena luas kontak permukaan pahat bola sangat sedikit. Hal ini menyebabkan waktu yang dibutuhkan menjadi sangat panjang. Untuk melakukan hal yang sama, mesin 5 sumbu dapat menggunakan pahat datar (*flat-end mill*) yang dimiringkan terhadap permukaan benda kerja. Bidang kontak antara benda kerja dan pahat datar yang dimiringkan jauh lebih besar dibanding dengan pahat bola. Hal ini selain menghasilkan proses pemesinan yang lebih cepat, kualitas permukaan jauh lebih halus. Pengurangan waktu pemesinan yang signifikan berdampak pada biaya operasi secara keseluruhan. Hal ini berdampak besar terhadap persaingan usaha pada industri manufaktur modern.



Gambar 2-1 Pergerakan Mesin 5 Sumbu [2]

## 2.1. Diagram Rantai Kinematika

Baughman [3] telah memberikan penjelasan dasar tentang mesin 5 sumbu melalui bukunya yang berjudul *Multi-Axis Machining with APT* tahun 1970. Sementara itu Held [4] juga memberikan pencerahan dengan menjelaskan secara singkat tentang definisi mesin multi sumbu pada bukunya yang berjudul *On the Computational Geometry of Pocket Machining* tahun 1991. Banyak artikel ilmiah maupun buku yang menjelaskan tentang prinsip kerja mesin 5 sumbu, termasuk mengenai struktur kinematika yang digunakan. Pada buku ini metode yang disajikan untuk menguraikan struktur kinematika mesin frais 5 sumbu merupakan metode yang diuraikan oleh Bohez [5]. Metode ini cukup sederhana dalam menjelaskan berbagai struktur kinematika mesin frais 5 sumbu sehingga lebih mudah dipahami.



Gambar 2-2 Mesin 5 Sumbu

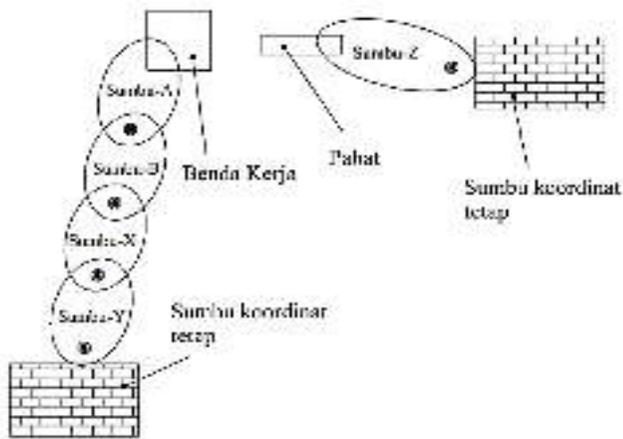
Jumlah sumbu sebuah mesin biasanya menggambarkan jumlah derajat kebebasan atau jumlah gerakan yang dapat dikendalikan oleh mesin. Dalam nomenklatur ISO terkait sumbu

pergerakan merekomendasikan untuk menggunakan sistem koordinat aturan tangan kanan. Pada aturan ini posisi sumbu pahat berada pada sumbu  $Z$ . Mesin freis 3 sumbu memiliki tiga gerakan lurus linear pada sumbu  $X, Y$ , dan  $Z$ . Arah sumbu pahat tidak berubah selama proses pemesinan. Kondisi ini menyebabkan fleksibilitas orientasi pahat relatif terhadap benda kerja menjadi terbatas. Salah satu cara untuk meningkatkan fleksibilitas orientasi pahat dan benda kerja adalah dengan menambah jumlah derajat kebebasan. Dengan penambahan jumlah derajat kebebasan maka proses setup tidak perlu bertambah. Untuk mesin linear tiga sumbu, fleksibilitas dapat ditingkatkan dengan menambah gerakan rotasi pada kedudukan benda kerja. Gambar 2-2 merupakan contoh struktur pergerakan mesin freis 5 sumbu.

Untuk dapat menganalisis pergerakan mesin, maka analisis diagram kinematika pergerakan mesin sangat dibutuhkan. Dari diagram kinematika tersebut maka dapat dilihat jenis sumbu pergerakan yang digunakan, apakah sumbu pergerakan meja benda kerja atau sumbu pergerakan pahat. Gambar 2-3 menampilkan diagram rantai kinematika untuk mesin yang ditunjukkan pada Gambar 2-2. Pada gambar ini dapat dilihat bahwa benda kerja memiliki empat sumbu pergerakan, yaitu pergerakan linear pada sumbu  $X$  dan  $Y$  serta pergerakan rotasi pada sumbu  $X$  dan  $Y$ . Sedangkan pahat memiliki satu pergerakan linear pada sumbu  $Z$ .

Lima derajat kebebasan adalah jumlah minimal yang dibutuhkan agar mampu melakukan gerakan fleksibel secara maksimum. Dengan lima derajat kebebasan maka pahat dan benda kerja dapat diorientasikan pada sudut relatif berapa pun. Jumlah sumbu minimum yang dibutuhkan untuk mencapai fleksibilitas maksimum dapat juga dipahami menggunakan sudut pandang

sebuah benda *rigid*. Untuk mengarahkan dua benda *rigid* relatif antara satu dengan yang lain pada sebuah ruangan, maka dibutuhkan enam derajat kebebasan untuk setiap benda, atau total 12 derajat kebebasan untuk kedua benda. Namun, untuk mengubah orientasi relatif antara dua benda maka tidak harus semua benda yang berputar atau bergeser. Sehingga jumlah derajat kebebasan dapat berkurang menjadi hanya lima derajat kebebasan.



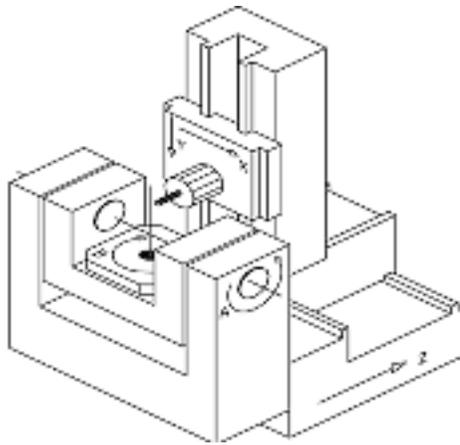
Gambar 2-3 Diagram Rantai Kinematika

## 2.2. Klasifikasi Struktur Kinematika Mesin 5 Sumbu

Pergerakan pahat dan benda kerja dapat dibagi menjadi dua kategori, gerak rotasi (R) dan gerak translasi (T). Berdasarkan gerakan tersebut, maka mesin 5 sumbu dapat dikategorikan menjadi 4 kelompok, yaitu

1. Tiga sumbu translasi dan dua sumbu rotasi
2. Dua sumbu translasi dan tiga sumbu rotasi
3. Satu sumbu translasi dan empat sumbu rotasi
4. Lima sumbu rotasi

Sebagian besar mesin 5 sumbu yang beredar di pasaran memiliki tipe pergerakan pahat kategori pertama, yaitu tiga sumbu translasi dan dua sumbu rotasi. Dan materi yang dibahas serta persamaan yang dikembangkan pada buku ini mengacu kepada struktur kinematika tersebut.



Gambar 2-4 Mesin Tipe XYZ A'B'

Sumbu pergerakan mesin dapat dibagi menjadi pergerakan pahat dan pergerakan meja sesuai dengan kombinasi yang diinginkan. Mesin 5 sumbu juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah sumbu yang dimiliki oleh pergerakan pahat dan pergerakan meja, serta urutan setiap sumbu pada rantai kinematika. Sebagai contoh dapat dilihat pada mesin di Gambar 2-2 di mana meja kerja memiliki empat sumbu, sedangkan pahat hanya memiliki satu sumbu. Klasifikasi dapat juga dibuat hanya berdasarkan lokasi sumbu rotasi, apakah pada meja atau pada pahat.

Sumbu mesin dapat disimbolkan menggunakan simbol sumbu kartesian yaitu X, Y, dan Z. Ketiga sumbu ini sekaligus

menggambarkan gerakan translasi. Sedangkan untuk gerak rotasi dilambangkan dengan simbol A, B, dan C. A adalah gerak rotasi pada sumbu X dan B adalah gerak rotasi pada sumbu Y. Sedangkan C adalah gerak rotasi pada sumbu Z. Jadi, pada mesin 5 sumbu sudah pasti akan memiliki tiga sumbu translasi yaitu sumbu X, Y, dan Z. Sedangkan dua sumbu rotasi lainnya dapat berupa kombinasi dari tiga sumbu rotasi yang ada. Kombinasi yang dapat dipilih adalah AB, AC, atau BC.

Sebagai contoh dapat dilihat pada mesin 5 sumbu yang disajikan pada Gambar 2-2. Mesin tersebut dapat dikategorikan sebagai X', Y', A', B', Z. Tanda apostrof pada simbol menunjukkan kepemilikan meja. Sehingga dari simbol tersebut dapat diketahui bahwa X, Y, A, B adalah sumbu pergerakan yang terletak pada meja kerja, sedangkan Z adalah sumbu pergerakan pahat. Contoh lain dapat dilihat pada Gambar 2-4. Mesin ini memiliki tipe XYZA'B' di mana tiga sumbu translasi terletak pada pahat dan dua sumbu rotasi terletak pada meja benda kerja.

Dengan jumlah sumbu sebanyak enam buah dan rantai kinematik yang terdiri dari pahat dan meja kerja, maka dapat dihasilkan banyak sekali kemungkinan kombinasi tipe mesin berdasarkan ilmu peluang. Bohez [5] membagi klasifikasi mesin 5 sumbu berdasarkan jumlah sumbu yang dimiliki pahat dan meja kerja dalam enam kategori. Masing-masing kategori dijelaskan di bawah ini.

1. **Mesin Tipe M5/P0**, di mana semua sumbu terletak pada pahat dan meja tidak dapat bergerak seperti yang terlihat pada Gambar 2-5a. Rantai kinematika mesin ini menggunakan kode XBYAZ. Mesin ini adalah salah satu model mesin 5 sumbu pertama yang mampu mengerjakan benda dengan ukuran besar. Akurasi mesin ini relatif

rendah karena cenderung menghasilkan eror yang cukup besar. Eror disebabkan karena adanya deformasi dan *backlash* pada pergerakan pahat. Kondisi ini disebabkan karena sambungan yang mengatur pergerakan pahat terlalu banyak dan saling berhimpitan.

2. **Mesin Tipe M0/P5**, di mana semua sumbu terletak pada meja dan pahat tidak dapat bergerak. Karena pahat tidak dapat bergerak maka mesin tipe ini sesuai untuk benda berukuran kecil. Konfigurasi mesin tipe ini ditunjukkan pada Gambar 2-5b.
3. **Mesin Tipe M1/P4**, di mana satu sumbu menggerakkan meja dan empat sumbu digunakan untuk menggerakkan pahat. Untuk tipe ini terdapat dua kemungkinan, sumbu yang dimiliki meja dapat berupa sumbu rotasi atau sumbu translasi.
4. **Mesin Tipe M4/P1**, di mana empat sumbu digunakan untuk menggerakkan meja dan satu sumbu untuk menggerakkan pahat. Sama seperti tipe sebelumnya, satu sumbu yang dimiliki pahat dapat berupa sumbu rotasi maupun sumbu translasi. Gambar 2-2 adalah salah satu contoh mesin 5 sumbu yang masuk dalam kategori ini. Satu sumbu yang menggerakkan pahat adalah sumbu translasi.
5. **Mesin Tipe M2/P3**, di mana dua sumbu digunakan untuk menggerakkan meja dan tiga sumbu menggerakkan pahat. Terdapat tiga kemungkinan untuk jenis sumbu penggerak meja, yaitu kedua sumbu adalah sumbu translasi (*TT*), kedua sumbu adalah sumbu rotasi (*RR*), atau kedua sumbu adalah campuran (*TR*). Gambar 2-5e menunjukkan salah satu contoh mesin di mana pahat memiliki dua sumbu rotasi dan satu sumbu translasi. Mesin ini memiliki kapasitas

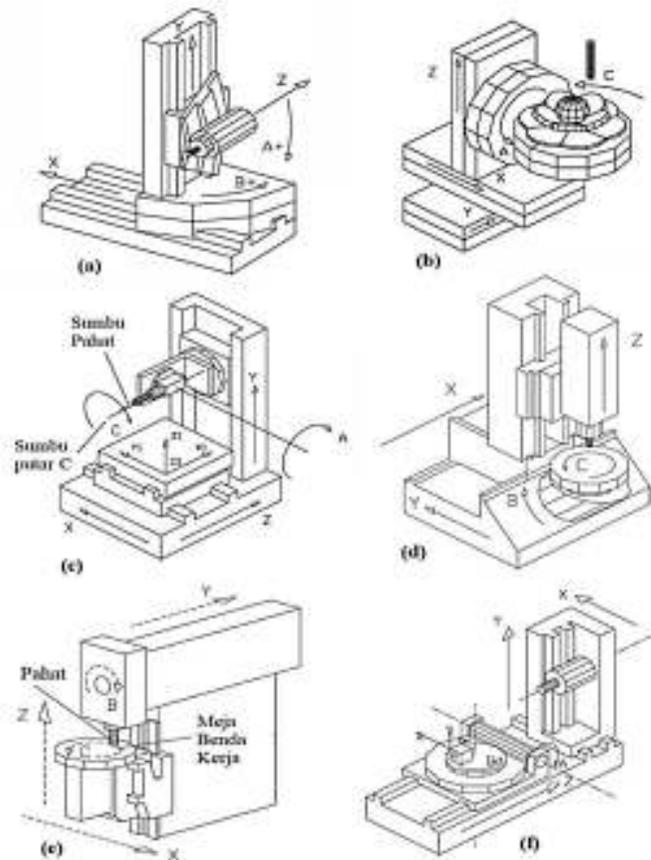
untuk mengerjakan benda dengan ukuran besar. Namun konstruksi penggerak pahat yang dimilikinya sangat ruwet. Konfigurasi yang paling umum adalah meja digerakkan oleh dua sumbu rotasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-5c - Gambar 2-5e.

6. **Mesin Tipe M3/P2**, di mana tiga sumbu menggerakkan meja dan dua sumbu menggerakkan pahat. Sama seperti konfigurasi sumbu meja pada Tipe M2/P3, terdapat tiga kemungkinan konfigurasi sumbu untuk penggerak pahat. Ketiga konfigurasi tersebut yaitu kedua sumbu merupakan sumbu translasi ( $TT$ ), kedua sumbu adalah sumbu rotasi ( $RR$ ), atau kedua sumbu adalah campuran ( $TR$ ). Gambar 2-5f menunjukkan mesin tipe M3/P2 dengan sumbu pahat konfigurasi campuran.

Mesin 5 sumbu juga bisa diklasifikasikan berdasarkan tempat di mana sumbu rotasi diterapkan. Dalam pembahasan berikut ini hanya fokus pada mesin dengan tipe dua sumbu rotasi dan tiga sumbu translasi. Terdapat tiga konfigurasi lokasi sudut rotasi yang mungkin diimplementasikan, yaitu a) sumbu rotasi pada spindel pahat, b) sumbu rotasi pada meja benda kerja, dan c) kombinasi dari keduanya.

**Mesin dengan sumbu rotasi pada meja benda kerja (Mesin 2/0)** atau disebut juga mesin 5 sumbu tipe *table tilting*. Mesin tipe ini ditunjukkan pada Gambar 2-5c dan Gambar 2-5f. Posisi spindel pahat horizontal memberi keuntungan di mana proses pemotongan lebih mudah sebagai dampak dari gravitasi. Selain itu, sumbu pahat yang selalu paralel dengan sumbu Z memberi keuntungan selama proses pemesinan. Permukaan benda kerja dengan lintasan berbentuk lingkaran dapat dieksekusi pada bidang XY mesin. Sehingga pekerjaan tersebut dapat dilakukan secara mudah

menggunakan mode pengaturan mesin 3 sumbu. Kompensasi terhadap panjang pahat terjadi sepanjang waktu melalui kendali NC seperti pada mesin 3 sumbu.



Gambar 2-5 Konfigurasi Sumbu Penggerak Meja dan Pahat

**Mesin dengan sumbu rotasi pada *spindle* pahat (Mesin 0/2)** atau disebut juga mesin 5 sumbu tipe *spindle tilting*. Mesin tipe ini ditunjukkan pada Gambar 2-5a dan Gambar 2-5c. Mesin tipe ini

memiliki keunggulan yaitu dapat mengerjakan benda yang berukuran sangat besar. Sedangkan kelemahannya terletak pada spindel pahat yang tidak stabil dan kurang kaku (*low stiffness*). Pada kecepatan putar di atas 5000 rpm selalu muncul momen aksi yang memberi perlawanan terhadap pahat. Hal ini disebabkan oleh efek giroskopis yang muncul ketika spindel pahat berputar terlalu kencang.

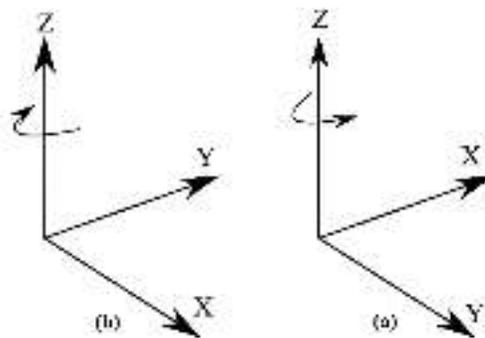
**Mesin dengan sumbu rotasi kombinasi (Mesin 1/1)** atau disebut juga mesin 5 sumbu tipe *table/spindle tilting*. Mesin tipe ini terlihat pada Gambar 2-5e. Satu sumbu rotasi diimplementasikan pada meja dan satu lagi pada spindel pahat. Saat ini banyak sekali beredar di pasaran mesin 5 sumbu dengan tipe seperti ini. Namun mesin dengan sumbu rotasi kombinasi ini juga menggabungkan kelemahan dari dua tipe sebelumnya. Dan biasanya mesin ini digunakan untuk memproduksi benda-benda berukuran kecil. Batas aplikasi dari mesin ini kurang lebih sama dengan mesin dua sumbu pada meja.

### 2.3. Perhitungan Kinematika Mesin 5 Sumbu

Mesin 5 sumbu menawarkan gerakan dengan lima derajat kebebasan yang menyebabkan pahat dapat dicondongkan ke depan (*inclined*) atau dimiringkan ke samping (*tilted*) relatif terhadap permukaan benda kerja. Konsekuensinya adalah orientasi ujung pahat dipengaruhi oleh kinematika mesin ketika melalui lintasan *nonlinear* pada koordinat sistem benda kerja atau *workpiece coordinate system* (WCS). Dengan kemampuannya ini maka mesin mampu menghasilkan komponen dengan permukaan yang kompleks. Namun di sisi lain, kondisi ini juga menghasilkan *undercut*, atau *overcut*, atau bahkan terjadi tabrakan antara bagian pemotong dan sisi lain dari mesin.

Menghasilkan program NC sesuai jalur lintasan pahat biasanya dimulai dengan mendistribusikan titik kontak antara pahat dan permukaan benda kerja (*cutter contact point*) atau disingkat *CC-point*. Pada mesin 5 sumbu, setiap *CC-point* berkaitan dengan vektor posisi pahat yang mengikuti aturan tangan kanan. *CC-point* kemudian dikonversikan menjadi titik lokasi pahat (*cutter location points*) atau disingkat dengan *CL-point*. *CL-point* adalah koordinat ujung pahat pada sistem koordinat benda kerja. Selanjutnya *CL-point* ditransformasikan ke koordinat mesin atau *machine coordinate system* (MCS). Koordinat pada MCS dikenal dengan *G-code* yang pada akhirnya diubah menjadi program NC.

Konversi dari *CC-point* ke *CL-point* sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri dan sudut kemiringan pahat. Proses transformasi *CL-point* dari WCS ke MCS membutuhkan informasi khusus tentang struktur kinematika mesin yang digunakan.



Gambar 2-6 Sistem Koordinat a) Aturan Tangan Kiri, b) Aturan Tangan Kanan

Sistem koordinat yang digunakan dalam menentukan kinematika mesin 5 sumbu menggunakan prinsip aturan tangan kanan (*right hand rule*). Dua aturan dalam sistem koordinat

ditunjukkan pada Gambar 2-6. Untuk aturan tangan kiri ditunjukkan pada Gambar 2-6a di mana jempol mewakili arah sumbu Z dan lipatan jari lainnya melambangkan gerak putar dari sumbu X ke sumbu Y. Ketika dilihat dari atas, maka putaran yang terjadi adalah searah dengan arah jarum jam. Berbeda dengan aturan tangan kiri, arah putaran aturan tangan kanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-6b berlawanan dengan arah jarum jam. Untuk merumuskan persamaan kinematika mesin, beberapa sistem koordinat perlu didefinisikan terlebih dahulu. Perhatikan Gambar 2-7,  $O_1$  adalah titik pusat WCS,  $O_2$  adalah sistem koordinat sumbu rotasi pertama,  $O_3$  adalah sistem koordinat sumbu rotasi kedua, dan  $O_4$  sistem koordinat sumbu rotasi spindel. Sumbu rotasi pertama disebut sebagai sumbu A dan sumbu rotasi kedua disebut sumbu B.

Bayangkan sebuah mesin 5 sumbu tipe 2/0 di mana dua sumbu rotasi terletak pada meja. Arah pergerakan setiap sumbu mesin dari titik acuan MCS akan dijelaskan di bawah ini. Ketentuan berikut ini dibuat dengan sudut pandang bahwa seorang pengamat sedang berada di depan mesin dan melihat ke arah sumbu Z positif.

1.  $x_m$  positif ketika meja bergerak ke arah kanan
2.  $y_m$  positif ketika meja bergerak ke arah bawah
3.  $z_m$  positif ketika pahat bergerak menjauh dari pengamat
4.  $a$  positif ketika meja berputar searah jarum jam pada sumbu A
5.  $b$  positif ketika meja berputar dari kanan ke kiri pada sumbu B

Arah positif dari setiap sumbu kartesian dipilih sedemikian rupa sehingga alat pemotong tampak seperti bergerak menjauh dari benda kerja ke arah positif, jika dilihat dari sistem koordinat spindel pahat di  $O_4$  (lihat Gambar 2-7a). Dengan kata lain, arah positif dari sumbu yang membawa meja berada pada arah berlawanan dengan arah positif dari sistem koordinat di  $O_4$ . Sebaliknya, arah positif dari sumbu pergerakan yang membawa

pahat berada pada arah yang sama dengan arah positif dari sistem koordinat di  $O_4$ . Sebagai contoh, sumbu pergerakan  $X$  dan  $Y$  dari mesin tipe 2/0 yang membawa meja memiliki arah yang berlawanan dengan arah positif  $X_4$  dan  $Y_4$ , sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2-7. Sementara sumbu  $Z$  yang membawa pahat memiliki arah positif yang sama dengan arah positif  $Z_4$ .

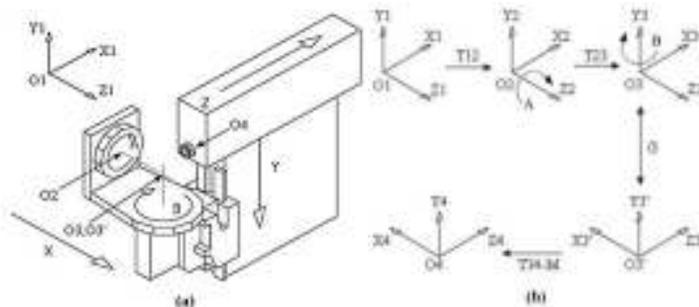
Transformasi dari WCS ke MCS terdiri dari tiga tahap transformasi, yaitu a) transformasi titik koordinat ke sistem koordinat lain tanpa melakukan pergerakan, b) transformasi titik koordinat akibat perputaran mesin, dan c) transformasi titik koordinat karena adanya gerakan translasi.

#### A. Transformasi Kinematika Mesin Tipe 2/0

Persamaan yang digunakan untuk transformasi kinematika pada mesin tipe 2/0 diuraikan di bawah ini.

**Langkah 1:** Transformasi dari WCS dengan titik pusat  $O_1$  ke  $O_2$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Sebuah titik  $W(x_W; y_W; z_W)$  pada sistem koordinat  $O_1$  ditransformasikan ke titik  $P_2(x_{P_2}; y_{P_2}; z_{P_2})$  di  $O_2$ .



Gambar 2-7 a) Mesin 2/0, b) Sistem Koordinat Sumbu

$$P_2 \begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \\ z_{P_2} \end{bmatrix} = W \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T_{1,2} \begin{bmatrix} x_{T_{1,2}} \\ y_{T_{1,2}} \\ z_{T_{1,2}} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Di mana  $T_{1,2}$  adalah selisih antara titik  $O_1$  dan  $O_2$  pada WCS.

**Langkah 2:** Rotasi titik  $P_2$  pada sumbu A di titik  $O_2$  dengan sudut putar sebesar  $a$  searah putaran jarum jam. Dalam proses ini titik  $P_2$  ditransformasi sehingga menghasilkan titik  $P_{2A}$ .

$$P_{2A} \begin{bmatrix} x_{P_{2A}} \\ y_{P_{2A}} \\ z_{P_{2A}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times P_2 \begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \\ z_{P_2} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu A.  $P_{2A}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{2A} = A[a] \times (W + T_{1,2}) \quad (2-3)$$

**Langkah 3:** Transformasi titik koordinat dari titik pusat  $O_2$  ke titik pusat  $O_3$ . Dalam proses ini titik  $P_{2A}$  di  $O_2$  selanjutnya ditransformasikan ke titik  $P_3$  pada titik pusat  $O_3$ . Transformasi terjadi karena ada pergeseran pada titik pusat.

$$P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} = P_{2A} \begin{bmatrix} x_{P_{2A}} \\ y_{P_{2A}} \\ z_{P_{2A}} \end{bmatrix} + T_{2,3} \begin{bmatrix} x_{T_{2,3}} \\ y_{T_{2,3}} \\ z_{T_{2,3}} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Di mana  $T_{2,3}$  adalah selisih jarak antara titik  $O_2$  dan  $O_3$  pada WCS.  $P_3$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_3 = A[a] \times (W + T_{1,2}) + T_{2,3} \quad (2-5)$$

**Langkah 4:** Rotasi pada sumbu B di titik pusat  $O_3$  dengan sudut putar sebesar  $b$ . Dalam proses ini titik  $P_3$  ditransformasikan terhadap sumbu B sehingga menghasilkan titik  $P_{3B}$ .

$$P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \cos b & 0 & -\sin b \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin b & 0 & \cos b \end{bmatrix} \times P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu A.  $P_{3B}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{3B} = B[b] \times A[a] \times (W + T_{1,2}) + T_{2,3} \quad (2-7)$$

**Langkah 5:** Rotasi koordinat dari  $O_3$  ke  $O_3'$

Proses ini untuk menyelaraskan orientasi sistem koordinat pada meja dengan sistem koordinat pada pahat ( $O_4$ ). Caranya adalah dengan melakukan rotasi pada sumbu  $Y_3$  sebesar  $90^\circ$  sehingga titik  $P_{3B}$  berpindah menjadi  $P_3'$ .

$$P_3' \begin{bmatrix} x_{P_3'} \\ y_{P_3'} \\ z_{P_3'} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$P_3'$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_3' = G \times B[b] \times A[a] \times (W + T_{1,2}) + T_{2,3} \quad (2-9)$$

**Langkah 6:** Transformasi koordinat dari  $O_3'$  ke  $O_4$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Titik  $P_3'$  pada sistem koordinat  $O_3$  ditransformasikan ke titik  $P_4(x_{P_4}; y_{P_4}; z_{P_4})$  di  $O_4$ .

$$P_4 \begin{bmatrix} x_{P_4} \\ y_{P_4} \\ z_{P_4} \end{bmatrix} = P_3' \begin{bmatrix} x_{P_3'} \\ y_{P_3'} \\ z_{P_3'} \end{bmatrix} + T_{3,4} \begin{bmatrix} x_{T_{3,4}} \\ y_{T_{3,4}} \\ z_{T_{3,4}} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Di mana  $T_{3,4}$  adalah selisih antara titik  $O_3$  dan  $O_4$  pada WCS.  $P_4$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_4 = G \times B[b] \times A[a] \times (W + T_{1,2}) + T_{2,3} + T_{3,4} \tag{2-11}$$

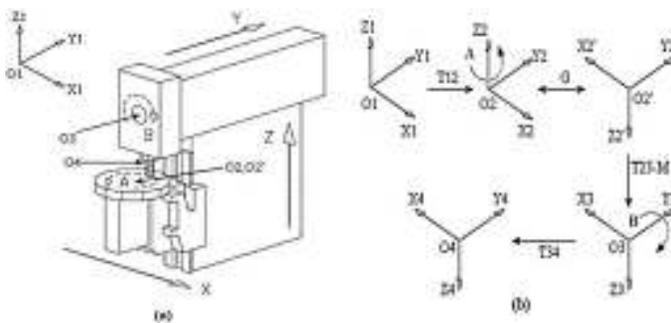
**B. Transformasi Kinematika Mesin Tipe 1/1.**

Persamaan yang digunakan untuk transformasi kinematika pada mesin tipe 1/1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-8 diuraikan di bawah ini.

**Langkah 1:** Transformasi dari WCS dengan titik pusat  $O_1$  ke  $O_2$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Sebuah titik  $W(x_W; y_W; z_W)$  pada sistem koordinat  $O_1$  ditransformasikan ke titik  $P_2(x_{P_2}; y_{P_2}; z_{P_2})$  di  $O_2$ . Persamaan yang digunakan sama seperti pada Persamaan ()

**Langkah 2:** Rotasi titik  $P_2$  pada sumbu A di titik sumbu  $O_2$  dengan sudut putar sebesar  $a$  dengan arah putar berlawanan arah jarum jam. Dalam langkah ini titik  $P_2$  ditransformasi sehingga menghasilkan titik  $P_{2A}$ .



Gambar 2-8 a) Mesin 1/1, b) Sistem Koordinat Sumbu

$$P_{2A} \begin{bmatrix} x_{P_{2A}} \\ y_{P_{2A}} \\ z_{P_{2A}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times P_2 \begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \\ z_{P_2} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu  $A$ .  $P_{2A}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{2A} = A[a] \times (W + T_{1,2}) \quad (2-13)$$

**Langkah 3:** Rotasi koordinat dari  $O_2$  ke  $O_2'$

Proses ini dilakukan untuk menyelaraskan orientasi sistem koordinat pada meja dengan sistem koordinat pada pahat ( $O_4$ ). Caranya adalah dengan melakukan rotasi pada sumbu  $Y_3$  sebesar  $180^\circ$  sehingga titik  $P_{2A}$  berpindah menjadi  $P'_{2A}$ .

$$P'_{2A} \begin{bmatrix} x_{P'_{2A}} \\ y_{P'_{2A}} \\ z_{P'_{2A}} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \times P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$P'_{2A}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P'_3 = G \times (A[a] \times (W + T_{1,2})) \quad (2-15)$$

**Langkah 4:** Transformasi titik koordinat dari titik pusat  $O_2'$  ke titik pusat  $O_3$ . Dalam proses ini titik  $P'_{2A}$  di  $O_2'$  selanjutnya ditransformasikan ke titik  $P_3$  pada titik pusat  $O_3$ . Transformasi terjadi karena adanya perpindahan titik pusat. Koordinat  $P_3$  dihitung menggunakan rumus berikut ini.

$$P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} = P'_{2A} \begin{bmatrix} x_{P'_{2A}} \\ y_{P'_{2A}} \\ z_{P'_{2A}} \end{bmatrix} + T_{2,3} \begin{bmatrix} x_{T_{2,3}} \\ y_{T_{2,3}} \\ z_{T_{2,3}} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$T_{2,3}$  adalah selisih jarak antara titik  $O_2$  dan  $O_3$  pada WCS.  $P_3$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_3 = G \times (A[a] \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3} \quad (2-17)$$

**Langkah 5:** Rotasi pada sumbu B di titik pusat  $O_3$  dengan sudut putar sebesar  $b$  dengan arah putar berlawanan dengan arah jarum jam. Dalam proses ini titik  $P_3$  ditransformasikan terhadap sumbu B sehingga menghasilkan titik  $P_{3B}$ .

$$P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \cos b & 0 & -\sin b \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin b & 0 & \cos b \end{bmatrix} \times P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu A.  $P_{3B}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{3B} = B[b] \times (G \times (A[a] \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3}) \quad (2-19)$$

**Langkah 6:** Transformasi koordinat dari  $O_3$  ke  $O_4$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Titik  $P_{3B}$  pada sistem koordinat  $O_3$  ditransformasikan ke titik  $P_4(x_{P_4}; y_{P_4}; z_{P_4})$  di  $O_4$ .

$$P_4 \begin{bmatrix} x_{P_4} \\ y_{P_4} \\ z_{P_4} \end{bmatrix} = P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} + T_{3,4} \begin{bmatrix} x_{T_{3,4}} \\ y_{T_{3,4}} \\ z_{T_{3,4}} \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Di mana  $T_{3,4}$  adalah selisih antara titik  $O_3$  dan  $O_4$  pada WCS.  $P_4$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_4 = B[b] \times (G \times (A[a] \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3}) + T_{3,4} \quad (2-21)$$

### C. Transformasi Kinematika Mesin Tipe 0/2.

Persamaan yang digunakan untuk transformasi kinematika untuk mesin tipe 0/2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-9 diuraikan di bawah ini.

#### Langkah 1: Rotasi koordinat dari $O_1$ ke $O_1'$

Proses ini bertujuan untuk menyetarakan orientasi sistem koordinat pada meja dengan sistem koordinat pada pahat ( $O_4$ ). Caranya adalah dengan melakukan rotasi pada sumbu  $Z_1$  sebesar  $90^\circ$  searah jarum jam. Kemudian putar kembali pada  $X_1$  sebesar  $90^\circ$  berlawanan arah jarum jam. Sebuah titik  $W(x_W; y_W; z_W)$  pada sistem koordinat  $O_1$  selanjutnya ditransformasikan ke titik  $W'(x_{W'}; y_{W'}; z_{W'})$  dengan titik pusat di  $O_1'$ .

$$W' \begin{bmatrix} x_{W'} \\ y_{W'} \\ z_{W'} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times W \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

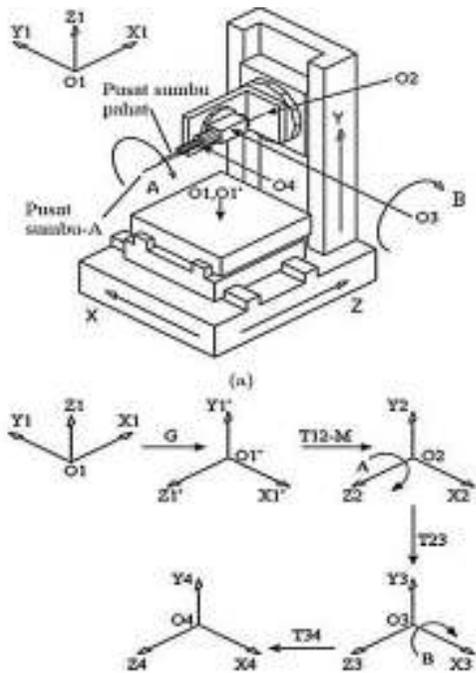
#### Langkah 2: Transformasi dari WCS dengan titik pusat $O_1$ ke $O_2$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Sebuah titik  $W'(x_{W'}; y_{W'}; z_{W'})$  pada sistem koordinat  $O_1$  ditransformasikan ke titik  $P_2(x_{P_2}; y_{P_2}; z_{P_2})$  di  $O_2$ .

$$P_2 \begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \\ z_{P_2} \end{bmatrix} = W' \begin{bmatrix} x_{W'} \\ y_{W'} \\ z_{W'} \end{bmatrix} + T_{1,2} \begin{bmatrix} x_{T_{1,2}} \\ y_{T_{1,2}} \\ z_{T_{1,2}} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

Di mana  $T_{1,2}$  adalah selisih antara titik  $O_1$  dan  $O_2$  pada WCS.  $P_2$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_2 = G \times (W + T_{1,2}) \quad (2-24)$$



Gambar 2-9 a) Mesin 2/0, b) Sistem Koordinat Sumbu

**Langkah 3:** Rotasi titik  $P_2$  pada sumbu A di titik  $O_2$  dengan sudut putar sebesar  $a$  searah putaran jarum jam. Dalam proses ini titik  $P_2$  ditransformasi sehingga menghasilkan titik  $P_{2A}$ .

$$P_{2A} \begin{bmatrix} x_{P_{2A}} \\ y_{P_{2A}} \\ z_{P_{2A}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times P_2 \begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \\ z_{P_2} \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu A.  $P_{2A}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{2A} = A[a] \times (G \times (W + T_{1,2})) \quad (2-26)$$

**Langkah 4:** Transformasi titik koordinat dari titik pusat  $O_2$  ke titik pusat  $O_3$ . Dalam proses ini titik  $P_{2A}$  di  $O_2$  selanjutnya ditransformasikan ke titik  $P_3$  pada titik pusat  $O_3$ . Transformasi terjadi karena ada pergeseran pada titik pusat.

$$P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} = P_{2A} \begin{bmatrix} x_{P_{2A}} \\ y_{P_{2A}} \\ z_{P_{2A}} \end{bmatrix} + T_{2,3} \begin{bmatrix} x_{T_{2,3}} \\ y_{T_{2,3}} \\ z_{T_{2,3}} \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Di mana  $T_{2,3}$  adalah selisih jarak antara titik  $O_2$  dan  $O_3$  pada WCS.  $P_3$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_3 = P_{2A} = A[a] \times (G \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3} \quad (2-28)$$

**Langkah 5:** Rotasi pada sumbu B di titik pusat  $O_3$  dengan sudut putar sebesar  $b$  searah putaran jarum jam. Dalam proses ini titik  $P_3$  ditransformasikan terhadap sumbu B sehingga menghasilkan titik  $P_{3B}$ .

$$P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos b & -\sin b \\ 0 & \sin b & \cos b \end{bmatrix} \times P_3 \begin{bmatrix} x_{P_3} \\ y_{P_3} \\ z_{P_3} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

Di mana  $A$  adalah matriks transformasi untuk perputaran pada sumbu A.  $P_{3B}$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_{3B} = B[b] \times (A[a] \times (G \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3}) \quad (2-30)$$

**Langkah 6:** Transformasi koordinat dari  $O_3$  ke  $O_4$

Dalam proses transformasi ini hanya terjadi perpindahan titik pusat secara translasi. Titik  $P_{3B}$  pada sistem koordinat  $O_3$  ditransformasikan ke titik  $P_4(x_{P_4}; y_{P_4}; z_{P_4})$  di  $O_4$ .

$$P_4 \begin{bmatrix} x_{P_4} \\ y_{P_4} \\ z_{P_4} \end{bmatrix} = P_{3B} \begin{bmatrix} x_{P_{3B}} \\ y_{P_{3B}} \\ z_{P_{3B}} \end{bmatrix} + T_{3,4} \begin{bmatrix} x_{T_{3,4}} \\ y_{T_{3,4}} \\ z_{T_{3,4}} \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Di mana  $T_{3,4}$  adalah selisih antara titik  $O_3$  dan  $O_4$  pada WCS.  $P_4$  dapat juga diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P_4 = B[b] \times (A[a] \times (G \times (W + T_{1,2})) + T_{2,3}) + T_{3,4} \quad (2-32)$$

# BAB 3.

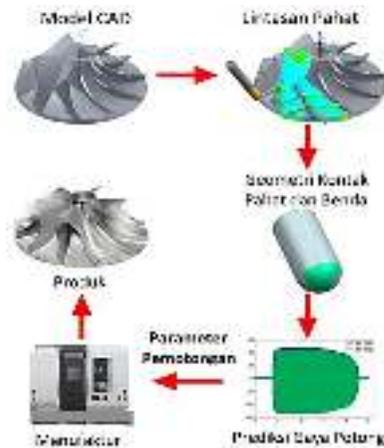
## MODEL SOLID UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA MESIN FREIS 5 SUMBU

Optimasi proses pemesinan, baik yang berbasis pada gaya potong maupun volume terpotong, membutuhkan informasi akurat tentang model geometri dari persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan tatal. Menurut Zheng dkk. [6], panjang tatal memberi efek yang besar pada gaya potong, sedang laju pemakanan mempengaruhi tebal tatal dan memberi dampak pada kekasaran permukaan produk.

Selain untuk menentukan geometri tatal, model geometri juga digunakan untuk menentukan geometri benda kerja dalam proses (*in-process workpiece*). Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk menghitung geometri tatal, di antaranya adalah: model solid, vektor diskrit, polihedral, elemen hingga, maupun metode analitis. Dalam Bab ini akan diuraikan metode solid untuk menentukan geometri hasil potongan pahat.

Model solid adalah metode representasi proses pemotongan benda kerja yang lengkap dan akurat. Metode ini sangat fleksibel digunakan karena mampu memberikan informasi yang dapat diimplementasikan pada berbagai bentuk geometri. Solid model digunakan untuk menggambarkan geometri dari sebuah bentuk yang memiliki volume tertutup atau disebut solid. Meski metode ini memiliki

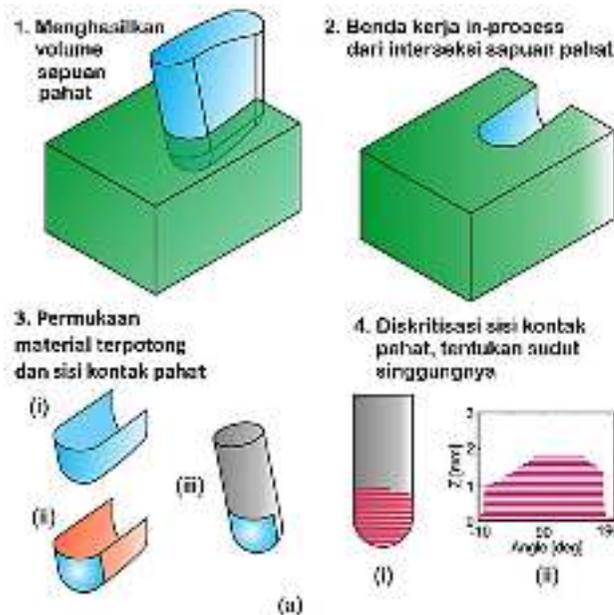
banyak keunggulan, namun terdapat banyak tantangan mendasar dalam merancang sebuah representasi geometri menggunakan model solid. Banyak studi yang telah dilakukan untuk mengembangkan metode ini dalam menentukan geometri bidang kontak pahat dan benda kerja.



Gambar 3-1 Alur Proses Pemesinan Freis Virtual

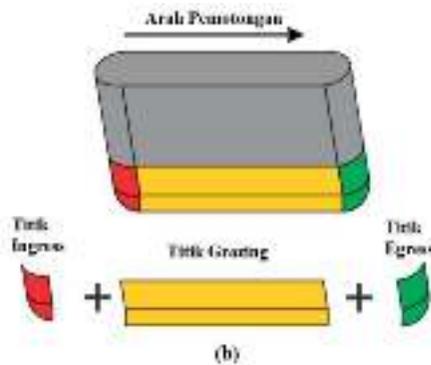
Ada beberapa metode model solid yang telah dikembangkan. Altintas dan Spence mengembangkan solid modeler yang bertujuan untuk menentukan ekstraksi dari kontak pahat dan benda kerja pada proses *milling* 2.5 sumbu. Solid modeler yang dikembangkan menggunakan representasi *constructive solid geometry* (CSG). Spence dkk. [7] melanjutkan pengembangan solid modeler untuk melakukan simulasi proses pemesinan *milling* 5 sumbu menggunakan pahat bola. Metode yang dikembangkan mengadopsi metode *boundary representation* (B-rep). Metode yang hampir sama dikembangkan oleh Boz dkk. [8]. Model solid digunakan untuk optimasi proses pemesinan 5 sumbu sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3-1.

Ada dua strategi pemesinan pada mesin perkakas NC 5 sumbu. Yang pertama disebut dengan *point milling*, yaitu kondisi di mana hanya ujung pahat (*tooltip*) yang bersentuhan dengan benda kerja. Proses pemotongan menggunakan strategi ini relatif lebih ringan karena kedalaman pemotongan dibuat dangkal menggunakan pahat bola. Strategi kedua disebut dengan *flank milling*. Strategi ini agak jarang digunakan dalam proses pemesinan. Pada strategi *flank milling*, bagian pahat yang bersentuhan dengan benda kerja tidak hanya ujung pahat, namun sisi samping pahat juga ikut bersentuhan. Oleh karena itu proses pemotongan terjadi secara agresif dan cukup berat. Sehingga dengan strategi ini maka umur pahat cenderung lebih pendek. Selain itu, dalam operasinya dibutuhkan mesin yang lebih kaku dan lebih bertenaga.



Gambar 3-2 Diagram Alir Proses Ekstraksi Bidang Kontak

Metode *point milling* fokus pada efisiensi laju pemakanan material, waktu pemesinan, kehalusan permukaan, tinggi *scallop*, serta penghindaran terjadinya interferensi global maupun lokal yang menyebabkan terjadinya *gouging*. *Scallop* adalah sisa material yang tidak terpotong sehingga hasil pemotongan menjadi kasar. Sedangkan *gouging* adalah pencungkilan bagian benda kerja yang seharusnya tidak dimakan. Dibanding dengan *point milling*, *flank milling* adalah metode yang kurang umum digunakan. Oleh karena itu maka dalam buku ini pembahasan hanya difokuskan pada *point milling*.



Gambar 3-3 Bentuk Amplop Tersapu (*Swept Envelope*) Pahat Bola

Terdapat beberapa langkah yang harus dilakukan untuk memperoleh geometri kontak pahat dan benda kerja pada proses pemesinan 5 sumbu sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3-2. Langkah pertama adalah menghasilkan volume pahat tersapu (*tool swept*) untuk memperoleh bentuk benda kerja dalam proses (*in-process workpiece*) dan bidang kontak antara pahat dengan benda kerja. Bentuk benda kerja dalam proses diperoleh melalui proses irisan antara benda kerja dengan volume terpotong dari sepanjang lintasan pahat, seperti yang terlihat pada langkah 2 Gambar 3-2.

Jika volume terpotong bersinggungan dengan benda kerja maka akan terjadi proses pemotongan benda kerja.

Volume material terpotong (*material removed*) dibentuk dari pembungkus pergerakan pahat yang disebut dengan amplop tersapu (*swept envelope*). Amplop tersapu dibangun dari tiga bagian, yaitu titik *egress*, titik *ingress*, dan titik *grazing*, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 3-3. Titik *egress* adalah konstruksi amplop tersapu pada bagian belakang. Sedangkan titik *grazing* adalah bagian tengah amplop dan titik *egress* adalah bagian depan. Secara teori, bagian pahat yang bersinggungan terletak pada daerah *egress* dari amplop tersapu pahat. Dengan kata lain bahwa persinggungan antara pahat dan benda kerja hanya terjadi pada bagian depan pahat sesuai arah pemotongan. Oleh karena itu maka bidang kontak antara pahat dan benda kerja diperoleh dengan memotong permukaan area *egress* bagian luar dari permukaan terpotong seperti terlihat pada Langkah 3 Gambar 3-2. Akhirnya bagian kontak pahat didiskritisasi menjadi lapisan-lapisan tipis sepanjang sumbu pahat. Titik-titik yang membentuk pembatas daerah kontak dikonversikan ke dalam sudut kontak yang mengacu kepada arah pemotongan.

Model solid untuk menentukan bentuk pahat yang disajikan pada buku ini adalah metode yang dikembangkan oleh Weinert dkk. [9] Metode solid yang dikembangkan menggunakan B-rep untuk menghasilkan volume terpotong. Sebagian dari metode yang dihasilkan merupakan pengembangan dari hasil penelitian yang dikembangkan oleh Wang dan Wang [10].

Pada bagian ini dan sub bab berikutnya akan dijelaskan metode untuk memperoleh volume terpotong, termasuk proses transformasi beberapa sistem koordinat yang digunakan. Pada bagian akhir akan disajikan implementasi algoritma yang dikembangkan pada proses pemesinan freis 5 sumbu.

### 3.1. Menentukan Permukaan Pahat Toroidal

Dengan menganggap bahwa sistem koordinat asli dari pahat frais berhimpit dengan sistem koordinat acuan pada titik  $O_M - XYZ$ , maka permukaan pahat toroidal dapat digambarkan menggunakan persamaan parametris sebagai berikut,

$$S_C(R_1, R_2, u, v) = \begin{pmatrix} (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \cos u \\ (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \sin u \\ -R_2 \cos v \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

di mana  $R_1$  dan  $R_2$  adalah radius mayor dan radius minor dari permukaan toroidal dengan  $u \in [0, 2\pi]$ ,  $v \in [0, \pi/2]$ . Pahat toroidal berubah menjadi pahat bola ketika ukuran minor radius dan mayor radius sama besar.

Sistem koordinat yang digunakan dalam membangun metode ini disajikan pada Gambar 3-4a. Sistem koordinat pahat yang direpresentasikan dengan  $e_1$ ,  $e_2$ , dan  $e_3$  diperoleh dengan cara berikut ini:

$$\begin{aligned} e_1 &= \mathbf{A} \\ e_2 &= \dot{\mathbf{A}}/[\dot{\mathbf{A}}], \text{ jika } [\dot{\mathbf{A}}] \neq 0 \\ e_3 &= \mathbf{A} \times e_2 \end{aligned} \quad (3-2)$$

Jika  $[\dot{\mathbf{A}}] = 0$ , maka sistem koordinat pahat ditentukan dengan cara berikut:

$$\begin{aligned} e_1 &= \mathbf{A} \\ e_2 &= \dot{\mathbf{A}}/[\dot{\mathbf{A}}], \text{ jika } [\dot{\mathbf{A}}] \neq 0 \\ e_3 &= \mathbf{A} \times e_2 \end{aligned} \quad (3-3)$$

Oleh karena itu maka bentuk permukaan pahat toroidal direpresentasikan sebagai berikut:

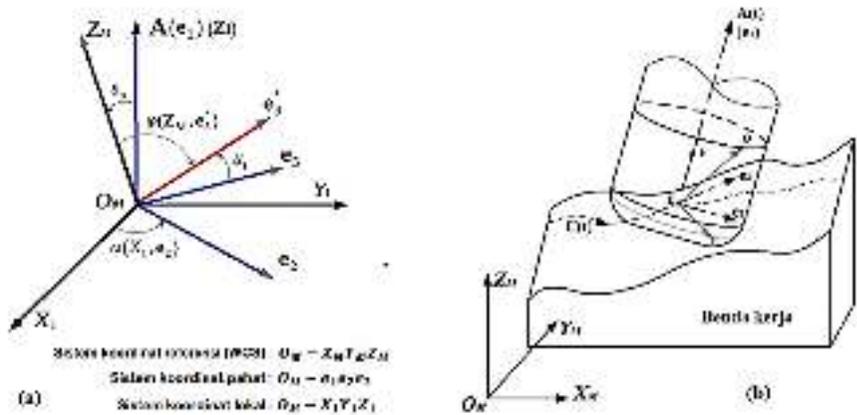
$$S_M(u, v, t) = C(t) + (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \cos u \cdot e_2 + (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \sin u \cdot e_3 - R_2 \cos v \cdot e_1 \quad (3-4)$$

Dengan menerapkan teori gerakan benda kaku (*rigid body motion*), uraikan lebih rinci mengenai  $e_1$ ,  $e_2$ , dan  $e_3$  dapat diperoleh.

$$e_1 = A(t) = Rot(Z, \theta_C) \cdot Rot(X, \theta_A) \cdot [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$= \begin{pmatrix} \sin \theta_C \cdot \cos \theta_A \\ -\cos \theta_C \cdot \sin \theta_A \\ \cos \theta_A \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

Di mana  $Rot(Z, \theta_C)$  adalah operator transformasi untuk putaran pada sumbu Z dan  $Rot(X, \theta_A)$  adalah transformasi untuk putaran pada sumbu X. Kedua operator transformasi tersebut diuraikan menggunakan matriks berikut ini,



Gambar 3-4 a) Sistem Koordinat Acuan, b) Koordinat dan Titik pada Pergerakan Mesin 5 Sumbu

$$Rot(Z, \theta_C) = \begin{bmatrix} \cos \theta_C & -\sin \theta_C & 0 \\ \sin \theta_C & \cos \theta_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$Rot(X, \theta_A) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_A & -\sin \theta_A \\ 0 & \sin \theta_A & \cos \theta_A \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

Kecepatan instan (*instantaneous velocity*) dari sumbu pahat dapat didefinisikan menggunakan kecepatan angular dan vektor satuan sebagai berikut,

$$\dot{A} = \omega \times A \quad (3-8)$$

Kecepatan angular instan  $\omega(t)$  untuk mesin freis 5 sumbu dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\omega = \dot{\theta}_C + Rot(Z, \theta_C) \cdot \dot{\theta}_A = \begin{pmatrix} \cos \theta_C \cdot \dot{\theta}_A \\ \sin \theta_C \cdot \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_C \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

Untuk mesin kinematika paralel seperti pada Mikromat Hexa 6X (Gambar 3-5), kecepatan angular instan  $\omega(t)$  harus menggunakan formulasi berikut ini,

$$e_1 = A(t) = Rot(Z, \theta_C) \cdot Rot(X, \theta_A) \cdot Rot(Z - \theta_C) \cdot [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$= \begin{pmatrix} \sin \theta_C \cdot \sin \theta_A \\ -\cos \theta_C \cdot \sin \theta_A \\ \cos \theta_A \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

$$\omega = \dot{\theta}_C + Rot(Z, \theta_C) \cdot \dot{\theta}_A + Rot(Z, \theta_C) \cdot Rot(X, \theta_A) \cdot (-\dot{\theta}_C)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \theta_C \cdot \dot{\theta}_A - \sin \theta_A \cdot \dot{\theta}_C \\ \sin \theta_C \cdot \dot{\theta}_A - \sin \theta_A \cdot \cos \theta_C \cdot \dot{\theta}_C \\ \dot{\theta}_C - \cos \theta_A \cdot \dot{\theta}_C \end{pmatrix} \quad (3-11)$$



Gambar 3-5 Mesin Freis 5 Sumbu Mikromat Hexa 6X

Misalkan sebuah titik  $P$  yang terletak pada permukaan pahat memiliki kecepatan  $V_P$ . Kecepatan origin dari sistem koordinat pahat dilambangkan dengan  $V_E$ . Untuk menghitung kecepatan titik  $P$  pada sistem koordinat WCS dilakukan menggunakan rumus berikut,

$$\begin{aligned} V_P &= V_E + \omega \times \overline{EP} \\ &= V_E - R_2 \cos v \cdot (\omega \times e_1) + (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \cos u \cdot (\omega \times e_2) + (R_1 + R_2 \cdot \sin v) \sin u \cdot (\omega \times e_3) \end{aligned} \quad (3-12)$$

di mana  $\overline{EP}$  adalah vektor dari titik  $E$  ke titik  $P$  sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3-4b.

Vektor normal  $N_P$  dalam sistem koordinat pahat yang bergerak dirumuskan sebagai berikut,

$$N_P = \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} / \left| \frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial S}{\partial v} \right| = \begin{bmatrix} \cos u \cdot \sin v \\ \sin u \cdot \sin v \\ -\cos v \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

Pada sistem koordinat acuan, vektor normal dapat dicari menggunakan persamaan berikut,

$$N_p = -\cos v \cdot e_1 + \cos u \cdot \sin v \cdot e_2 + \sin u \cdot \sin v \cdot e_3 \quad (3-14)$$

Hal ini berarti bahwa sebuah titik dinyatakan berada pada permukaan amplop (*envelope surface*) ketika  $N_p$  pada titik tersebut tegak lurus terhadap vektor kecepatannya. Dengan menerapkan bahwa  $N_p \cdot V_p = 0$ , maka  $V_p$  pada Persamaan (3-12) sama dengan  $V_E$ . Sehingga fungsi tangen berubah menjadi,

$$f_{(u,v,t)} = \sin v [\cos u \cdot (e_2 \cdot V_E) + \sin u \cdot (e_3 \cdot V_E)] + \cos v [(-e_1 \cdot V_E) + R_1 \cos u \cdot (e_3 \cdot \omega)] = 0 \quad (3-15)$$

dan,

$$v(u, t) = \tan^{-1} \left[ \frac{(e_1 \cdot V_E) - (e_3 \cdot \omega)R_1 \cos u \cdot}{(e_2 \cdot V_E) \cdot \cos u + (e_3 \cdot V_E) \cdot \sin u} \right] \quad (3-16)$$

Di mana  $v(u, t)$  berada dalam batas  $u_t \leq u \leq u_t + \pi$ . Sedangkan  $u_t$  dibatasi oleh nilai  $v = \pi/2$ . Dari Persamaan (3-15) dapat diperoleh,

$$u_t \left( v = \frac{\pi}{2} \right) = \tan^{-1} \left[ -\frac{e_2 \cdot V_E}{e_3 \cdot V_E} \right], \text{ jika } e_3 \cdot V_E \neq 0 \quad (3-17)$$

Atau

$$u_t = \frac{3\pi}{2}, \text{ jika } e_3 \cdot V_E = 0 \quad (3-18)$$

Jika  $\omega \times \mathbf{A} = 0$ , maka dengan menganggap bahwa  $e_3 \cdot V_E = 0$  seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3-3), Persamaan (3-16) berubah menjadi,

$$v(u, t) = \tan^{-1} \left[ \frac{(e_1 \cdot V_E)}{(e_2 \cdot V_E) \cdot \cos u} \right] \quad (3-19)$$

$e_1$  dan  $e_2$  pada persamaan (3-19) dapat didefinisikan menggunakan Persamaan (3-3).

Selain itu terdapat beberapa kondisi yang perlu mendapat perlakuan berbeda. Jika  $e_1 \times V_E = 0$ , maka Persamaan (3-15) berubah bentuk menjadi,

$$f_{(u,v,t)}|_{e_1 \times V_E=0} = \cos v [(-e_1 \cdot V_E) + R_1 \cos u \cdot (e_3 \cdot \omega)] = 0 \quad (3-20)$$

Persamaan (3-20) valid digunakan untuk semua parameter pada  $u \in [0, 2\pi]$  dan  $v \in \pi/2$ . Ini berarti bahwa bentuk profil amplop tersapu menjadi lingkaran yang membatasi permukaan bagian atas. Ketika  $e_1 \times V_E = 0$ , maka

$$f_{(u,v,t)}|_{e_1 \times V_E=0} = \cos v [(e_2 \cdot V_E) \sin v + R_1 \cos u \cdot (e_3 \cdot \omega)] = 0 \quad (3-21)$$

Atau ketika  $V_E = 0$ , maka pahat hanya memiliki gerakan rotasi, sehingga,

$$f_{(u,v,t)}|_{V_E=0} = \cos u \cdot \cos v \cdot (e_3 \cdot \omega) \cdot R_1 = 0 \quad (3-22)$$

Mengingat bahwa  $e_3 \cdot \omega \neq 0$ , maka diperoleh  $v \in [0, 2\pi]$  ketika  $u = \pi/2$  atau  $u = 3\pi/2$ . Dan ketika  $v = \pi/2$ , maka diperoleh  $u \in [0, 2\pi]$ .

Dalam ketiga kasus di atas, profil amplop tersapu merupakan kurva persinggungan antara batas permukaan pahat dan bidang yang melewati sumbu utama pahat. Untuk kondisi umum di mana  $e_1 \cdot V_E = 0$ , maka rumusnya berubah menjadi,

$$f_{(u,v,t)} = \sin u \cdot [(e_3 \cdot V_E) \cdot \sin v] + \cos u \cdot [(e_2 \cdot V_E) \cdot \sin v + (e_3 \cdot \omega) \cdot R_1 \cos v] = 0 \quad (3-23)$$

$$u_t|_{e_1 \cdot V_E=0} = \tan^{-1} \left[ \frac{e_2 \cdot V_E}{e_3 \cdot V_E} - \frac{(e_3 \cdot \omega) R_1}{(e_3 \cdot V_E) \cdot \tan v} \right] \quad (3-24)$$

$$u_t|_{e_1 \cdot V_E=0} = \pi/2 \text{ jika } v \neq 0 \quad (3-25)$$

$$u_t|_{e_1 \cdot V_E=0} = 3\pi/2, \text{ jika } v = 0 \quad (3-26)$$

### 3.2. Menentukan Permukaan Pahat Silinder

Yang memiliki permukaan berbentuk silinder tidak hanya pahat datar. Sebagian dari pahat toroidal maupun pahat bola memiliki bagian atas yang berbentuk silinder. Sehingga persamaan yang digunakan untuk mendeskripsikan permukaan silinder berbeda dengan metode untuk mendeskripsikan bentuk toroidal sebagaimana yang telah diuraikan sebelumnya.

Secara umum konsep yang digunakan sama seperti saat menurunkan rumus untuk pahat toroidal. Namun terdapat beberapa rumus yang berbeda disebabkan rumus parametrik untuk menentukan bentuk permukaan pahat silinder berbeda dengan pahat toroidal. Permukaan silinder secara parametris dirumuskan sebagai berikut,

$$S_C(R_1, R_2, R_3) = \begin{pmatrix} R \cos u \\ R \sin u \\ k \end{pmatrix} \quad (3-27)$$

di mana radius silinder  $(R) = R_1 + R_2$  seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (3-1), dan  $k$  adalah panjang silinder. Sedangkan rumus untuk menentukan permukaan silinder pada sistem koordinat referensi dapat dituliskan sebagai berikut,

$$S_C(u, v, t) = C(t) + k \cdot e_1 + R \cos u \cdot e_2 + R \sin u \cdot e_3 \quad (3-28)$$

Misalkan  $V(Q)$  adalah kecepatan sebuah titik sembarang  $Q$  pada permukaan silinder, maka,

$$\begin{aligned} V(Q) &= V_E + \omega \times \overline{EQ} \\ &= V_E + |\omega \times e_1| \cdot k \cdot e_2 + R \cos u \cdot (\omega \times e_2) + R \sin u \cdot (\omega \times e_3) \end{aligned} \quad (3-29)$$

Perlu dicatat bahwa kecepatan pada titik  $Q$  yaitu  $\omega \times e_2 \neq -|\omega| \cdot e_1$  dan  $\omega \times e_2 \neq 0$ , kecuali untuk  $\omega = |\omega| \cdot e_3$ . Arah normal  $N(Q)$  pada sistem koordinat referensi adalah sebagai berikut,

$$N(Q) = \cos u \cdot e_2 + \sin u \cdot e_3 \quad (3-30)$$

Dengan menerapkan bahwa  $N(Q) \cdot V(Q) = 0$ , sehingga fungsi tangen berubah menjadi,

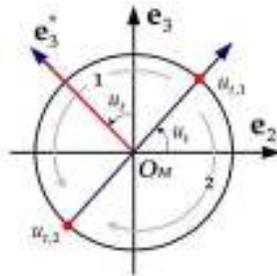
$$f_{(u,v,t)} = \cos u \cdot (e_2 \cdot V_E) + k \cdot \cos u \cdot |\omega \times e_1| + \sin u \cdot (e_3 \cdot V_E) = 0 \quad (3-31)$$

Sehingga,

$$u(k, t) = \tan^{-1} \left[ \frac{e_2 \cdot V_E + k \cdot |\omega \times e_1|}{e_3 \cdot V_E} \right] \quad (3-32)$$

Jika  $e_3 \cdot V_E \neq 0$ , atau  $u_t = 3\pi/2$  jika  $e_3 \cdot V_E = 0$ . Jika  $\omega \times A = 0$  dan dengan mempertimbangkan  $e_3 \cdot V_E = 0$  seperti ditunjukkan pada Persamaan (3-3), maka penyelesaian dapat diperoleh dari Persamaan (3-31).

Pada persamaan turunan yang telah diuraikan sebelumnya terdapat beberapa persamaan eksplisit yang digunakan untuk menghitung profil amplop tersapu. Untuk setiap  $u(u_{t,1} \leq u \leq u_{t,2})$ , maka dapat ditentukan nilai  $v$  menggunakan Persamaan (3-16) dan Persamaan (3-19) pada permukaan toroidal. Setelah itu maka bentuk kurva tersapu 3D  $\psi_C(s, t)$  dapat diperoleh menggunakan kurva B-spline dengan cara menginterpolasi gabungan titik  $P(u, v)$  dan  $Q(u, k)$ .



Gambar 3-6 Menentukan Interpolasi  $u_t$  untuk Pahat Toroidal

Sebuah pendekatan diberikan menggunakan Persamaan (3-3) untuk menjelaskan kondisi-kondisi umum yang mungkin terjadi. Seperti yang terlihat di Gambar 3-6 di mana terdapat dua lokasi yang mungkin bagi parameter  $u$  untuk menghitung parameter  $v$ .

$$e_3^* = Rot(A, u_t) \cdot e_3 \quad (3-33)$$

$e_3^*$  adalah vektor determinatif yang diperoleh dengan cara merotasi sumbu  $e_3$  pada sumbu  $A(t)$  dengan sudut  $u_t$ . Jika sudut determinatif  $\varphi(Z_M, e_3^*)$  antara  $e_3^*$  dan sumbu  $Z_M$  adalah sama dengan  $\pi/2$ , maka kondisi khusus terjadi. Kondisi ini diuraikan pada Persamaan (3-20) - Persamaan (3-26). Jika sudut  $\varphi \in (0, \pi/2)$  maka nilai  $u_{t,1}$  dan  $u_{t,2}$  harus saling bertukar.

### Algoritma I: Menentukan bentuk profil pergerakan pahat

#### Input:

$\{C, \theta\}$  : titik kontrol dan sudut orientasi yang diperoleh dari data NC

$\{V_E, \theta\}$  : kecepatan titik kontrol  $C$  dan kecepatan rotasi

$\tau$  : toleransi bentuk B-spline

**Output:** Kurva 3D  $\psi_C(s, t)$  pahat bergerak

#### Langkah 1: Menghitung nilai $u_t$

Hitung kecepatan angular dan perpindahan titik pada permukaan yang bergerak menggunakan Persamaan (3-2) - Persamaan (3-9).

Hitunglah nilai  $u_t$  menggunakan Persamaan (3-17) - Persamaan (3-18)

#### Langkah 2: Menghitung parameter $v$ berdasarkan nilai $u_t$

Hitung sudut  $\varphi(Z_M, e_3^*)$  menggunakan Persamaan (3-33).

If  $\varphi(Z_M, e_3^*) = \pi/2$

*Output:* Kurva profil planar

Elseif  $\varphi(Z_M, e_3^*) > \pi/2$

Set  $u_t \in [u_{t,1}, u_{t,2}], u_{t,1} = u_t, u_{t,2} = u_t + \pi$

Else

Set  $u_t \in [u_{t,1}, u_{t,2}], u_{t,1} = u_t - \pi, u_{t,2} = u_t$

Hitung parameter  $v$  pada permukaan toroidal menggunakan Persamaan (3-16) untuk semua nilai  $u_t$ .

Hitung parameter  $u$  pada permukaan silinder menggunakan Persamaan (3-32) untuk semua nilai  $k$ .

Get  $\{u, v\}$  dan  $\{u, k\}$

### Langkah 3: Menghasilkan Profil 3D

Hitung  $P_i(u, v)$  pada permukaan toroidal  $S_C(u, v)$  dari Persamaan (3-1) menggunakan  $\{u, v\}$

Hitung  $Q_i(u, k)$  pada permukaan silinder  $S_C(u, k)$  dari Persamaan (3-28) menggunakan  $\{u, k\}$

Get profil 3D  $\psi_C^t(s, t)$  pada permukaan toroidal

Get profil 3D  $\psi_C^c(s, t)$  pada permukaan silinder

### Langkah 4: Menutup profil tersapu

Hubungkan setiap bagian dari profil tersapu menggunakan  $\psi_C^t(s, t)$  dan  $\psi_C^c(s, t)$

Get  $\psi_C(s, t)$

**Output Kurva 3D  $\psi_C(s, t)$**

## 3.3. Transformasi Sistem Koordinat dan Menentukan Kecepatan Titik Kontrol

Persamaan untuk menentukan profil tersapu telah disampaikan pada bagian sebelumnya, di mana profil tersapu ditentukan berdasarkan lokasi pahat. Oleh karena itu maka pahat harus

ditransformasi ke sistem koordinat WCS yang digunakan sebagai sistem koordinat referensi. Bentuk profil tersapu dapat ditransformasikan ke posisi dan orientasi yang diinginkan dengan cara mengalikan dengan beberapa matriks rotasi dan satu matriks translasi. Pada setiap NC-*point*, bentuk profil tersapu  $\psi_M(s, t)$  pada sistem koordinat WCS untuk mesin 5 sumbu dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\psi_M(s, t) = C(t) + Rot(Z, \theta_C) \cdot Rot(X, \theta_A) \cdot Rot(Z, -\alpha) \cdot \psi_C(s, t) \quad (3-34)$$

di mana  $\alpha$  dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\alpha = \alpha(X_1, e_2) \quad (3-35)$$

di mana  $\alpha(X_1, e_2)$  adalah sudut antara sumbu  $X$  dari sistem koordinat lokal  $O_M - X_1Y_1Z_1$  dan sumbu  $e_2$ . Perlu dicatat bahwa  $\alpha \in [-\pi, \pi]$ , yang diperoleh dengan perkalian silang (*cross product*)  $X_1 \times e_2$ . Sudut bernilai positif jika perkalian silang memiliki orientasi yang sama dengan sumbu pahat  $A(t)$ . Jika tidak maka sudut bernilai negatif. Sumbu  $X_1$  diperoleh dengan cara transformasi sistem koordinat. Koordinat  $O_M - X_1Y_1Z_1$  diperoleh dengan mengacu ke Gambar 3-6 dan dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$O_M - X_1Y_1Z_1 = Rot(Z, \theta_C) \cdot Rot(X, \theta_A) \cdot O_M - X_MY_MZ_M \quad (3-36)$$

Pada Persamaan (3-2) - Persamaan (3-11) telah diuraikan tiga jenis kecepatan, yaitu  $V_E$ ,  $\dot{\theta}_A$ , dan  $\dot{\theta}_C$ . Ketiga variabel kecepatan ini digunakan untuk menggambarkan kecepatan sebuah titik pada permukaan pahat. Informasi ini biasanya tidak terdapat pada data NC. Untuk menentukan gerakan pahat di antara dua buah CC-*point*, maka dilakukan dengan cara interpolasi linear sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} C(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_i \\ \theta_i \end{bmatrix} + \frac{t}{\Delta t} \left( \begin{bmatrix} C_{i+1} \\ \theta_{i+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \right), 0 \leq t \leq \Delta t \quad (3-37)$$

di mana,

$$\Delta t = \left[ [C_{i+1} \ \theta_{i+1}]^T - [C_i \ \theta_i]^T \right] / v_f \quad (3-38)$$

dan  $v_f$  adalah laju pemakanan dari satu *CC-point* ke *CC-point* berikutnya yang diperoleh dari data NC. Oleh karena itu maka kecepatan titik kontrol dihitung menggunakan rumus berikut,

$$V_E = \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta t} \quad (3-39)$$

Sedangkan kecepatan perubahan sudut orientasi dihitung sebagai berikut,

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{\theta}_C \end{bmatrix} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\Delta t} \quad (3-40)$$

Dengan mensubstitusi Persamaan (3-39) dan Persamaan (3-40) ke dalam Persamaan (3-6) - Persamaan (3-11) maka akan diperoleh nilai  $V_E$  dan  $\omega$ .

### 3.4. Membangun Volume Terpotong

Sebelum membangun volume terpotong, maka terlebih dahulu harus membuat profil amplop tersapu. Profil amplop tersapu sebuah pahat adalah kurva 3D pada koordinat kartesian. Bentuk profil amplop tersapu bervariasi untuk setiap *CC-point* tergantung dari sudut yang dibentuk antara sistem koordinat WCS dan sistem koordinat pahat ( $\varphi(Z_M, e_3^*)$ ), seperti yang terlihat pada Gambar 3-4a. Permukaan amplop tidak dapat direpresentasikan sebagai sebuah permukaan sederhana. Dengan menggunakan *B-spline*, permukaan amplop didefinisikan sebagai berikut.

$$C_k^w(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_{i,k}^w \quad (k = 0, \dots, n) \quad (3-41)$$

Anggap bahwa  $C_k^w$  adalah sekumpulan kurva rasional dan non rasional (dihasilkan dari **Algoritma I**). Bentuk amplop merupakan sebuah proses pencampuran kurva profil secara bersama untuk membentuk sebuah permukaan.

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,p,q}(u, v) P_{i,j} \quad (3-42)$$

di mana  $R_{i,p,q}(u, v)$  merupakan fungsi basis rasional. Kurva  $S(u, v)$  yang dihasilkan dari  $C_k^w(u)$  adalah,

$$S(u, v_k) = C_k(u) \quad (3-43)$$

di mana  $v_k$  adalah sekumpulan variabel yang nilainya belum diketahui. Persamaan (3-42) akan berubah menjadi,

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m R_{i,p}(u) \left( \sum_{j=0}^n R_{j,q}(v) P_{i,j} \right) \quad (3-44)$$

jika,

$$S(u, v) = \sum_{j=0}^n R_{j,q}(v) P_{i,j} \quad (3-45)$$

dan

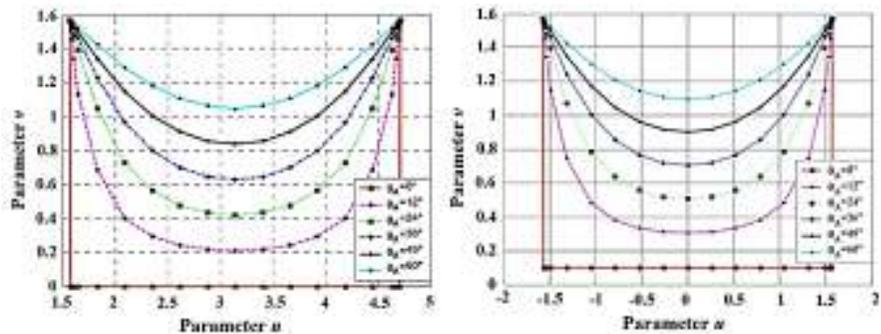
$$Q_i(\bar{v}_j) = P_{i,j} \quad (i = 0, \dots, m; j = 0, \dots, n) \quad (3-46)$$

Persamaan (3-41) - Persamaan (3-46) digunakan untuk menghasilkan interpolasi  $m + 1$  yang melintasi titik kontrol profil tersapu. Akhirnya Persamaan (3-45) dapat digunakan untuk membangun permukaan amplop.

Permukaan amplop selanjutnya digunakan untuk membentuk dinding luar dari volume terpotong. Secara umum dibutuhkan 10 permukaan amplop untuk membentuk volume terpotong yang dihasilkan dari gerakan 3 sumbu menggunakan pahat bola (Imani dan Elbestawi [11]). Ketika pahat bekerja pada mesin 5 sumbu, bentuk profil tersapu pahat adalah kurva 3D dan

tidak berbentuk kurva datar. Oleh karena itu maka batas permukaan yang bersinggungan harus ditentukan untuk memperoleh profil volume terpotong agar dihasilkan model solid. Sebuah volume terpotong yang tertutup dibentuk dari tiga bagian, yaitu permukaan *Ingress*, *Grazing*, dan *Egress*.

$$E_M^\psi = \text{Ingress} + \text{Grazing} + \text{Egress} \quad (3-47)$$



Gambar 3-7 Profil Tersapu Toroidal Cutter 2D untuk: a)  $[\omega] = 0$ , dan b)  $\omega = (0.1, 0, 0)$

### 3.5. Hasil Simulasi

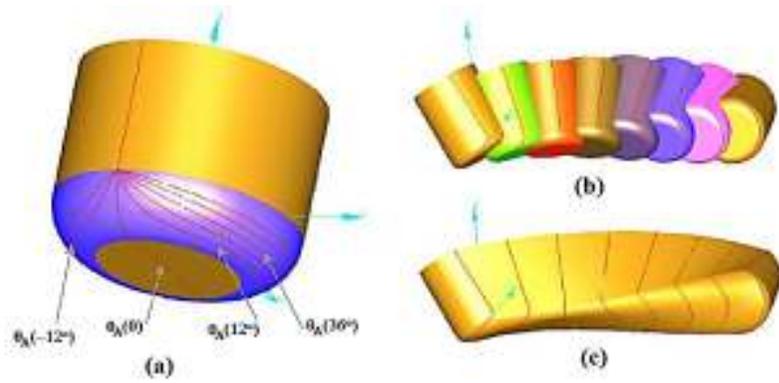
Algoritma yang disajikan pada subbab sebelumnya telah diuji dengan dua buah kasus deskripsi parametrik 2D  $(u, v)$  dari sebuah permukaan toroidal sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3-7. Lintasan pahat toroidal diatur sebagai berikut: konfigurasi awal adalah  $(C(t), \theta(t)) = ((0, 0, 0), (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ))$  dan konfigurasi final  $(C(t), \theta(t)) = ((0, 100, 0), (60^\circ, 0^\circ, 0^\circ))$  dengan arah pemotongan yang konstan  $(V_E = (0, 20, 0))$  terhadap sistem koordinat referensi. Nilai masing-masing parameter secara gradual bervariasi. Hasil perhitungan menggunakan kecepatan angular  $[\omega] = 0$  disajikan pada Gambar 3-7a dan dengan menggunakan kecepatan angular

$\omega = (0.1, 0, 0)$  ditunjukkan pada Gambar 3-7b. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa kondisi khusus terjadi ketika  $\varphi(Z_M, e_3^*) = \pi/2$ . Selain itu, distribusi parameter  $v$  bervariasi terhadap kecepatan angular  $\omega$ .

Dengan membandingkan Gambar 3-7a dan Gambar 3-7b maka dapat diketahui bahwa area parameter  $v$  tidak berada pada daerah  $[0, \pi/2]$ . Meski demikian, hubungan antara parameter  $u$  untuk setiap  $v (0 \leq v \leq \pi/2)$  pada salah satu kondisi antara  $[\omega] = 0$  atau  $[\omega] \neq 0$ .

Gambar 3-8a menyajikan bentuk profil 3D tertutup dari pahat toroidal. Kurva yang ditunjukkan pada bagian dasar pahat berhubungan dengan Gambar 3-7b. Pada bagian kanan dari dasar pahat menunjukkan bahwa kurva yang dihasilkan sejalan dengan hasil yang disajikan pada Gambar 3-7b. Kurva profil 3D menjadi kurva planar ketika  $\varphi(Z_M, e_3^*) = \pi/2$ . Sedangkan pada bagian kiri dari dasar pahat menunjukkan hasil dari kondisi ketika  $\varphi(Z_M, e_3^*) < \pi/2$ . Dari Gambar 3-8a dapat disimpulkan bahwa profil kurva akan semakin berbeda ketika pahat mengubah orientasi dengan sudut yang lebih besar saat melakukan gerakan.

Gambar 3-8b merupakan proses pembentukan permukaan amplop pada proses pemesinan freis 5 sumbu. Pahat bergerak dengan orientasi pahat awal  $\theta = (24^\circ, 0^\circ, 180^\circ)$  dan secara bertahap orientasi pahat berubah menjadi  $\theta = (60^\circ, 0^\circ, 240^\circ)$  dengan kecepatan rotasi konstan  $\dot{\theta}(t) = (0.1, 0, 0.1)$ . Gambar 3-8c menunjukkan prosedur umum dalam menghasilkan bentuk volume terpotong menggunakan model B-rep. Dengan menggunakan permukaan *ingress*, *egress*, dan *grazing* maka volume terpotong dapat dibangun menjadi bentuk yang solid.



Gambar 3-8 Menentukan Interpolasi  $u_t$  untuk Pahat

# BAB 4.

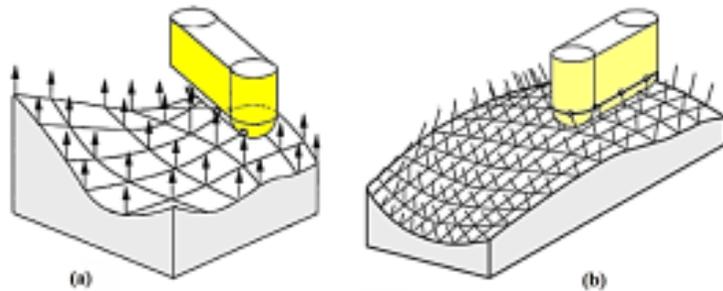
## **METODE VEKTOR DISKRIT UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA MESIN FREIS 5 SUMBU**

Model geometris merupakan bagian penting dalam proses simulasi untuk menentukan laju pemakanan. Informasi yang dihasilkan dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan luas kontak antara pahat dan benda kerja. Selain itu, informasi model geometris juga dapat digunakan untuk menentukan bentuk benda kerja dalam proses (*in-process workpiece*).

Dibandingkan dengan model solid, vektor diskrit memiliki keunggulan dalam hal waktu komputasi. Vektor diskrit memerlukan struktur data yang sederhana dan analisis numerik yang mudah. Dengan metode ini maka permukaan benda dibagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari susunan vektor dalam jumlah banyak.

Terdapat dua metode yang paling banyak digunakan pada model diskrit, yaitu model *Discrete Normal Vector* (DNV) dan model *Discrete Vertical Vector* (DVV). DNV merepresentasikan benda kerja dengan sekumpulan vektor yang disertai dengan informasi posisi dan arah seperti ditunjukkan pada Gambar 4-1a. Namun dengan metode ini maka arah vektor menjadi tidak identik sehingga

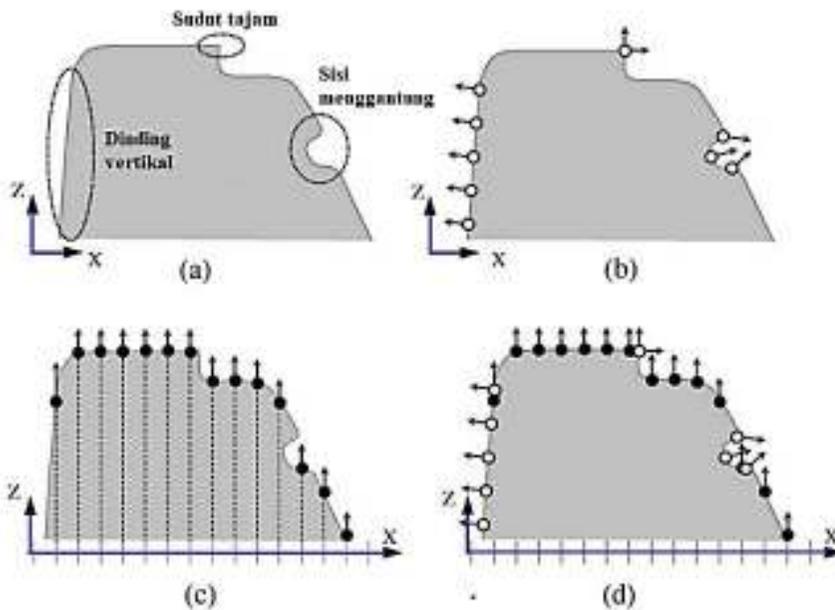
peletakan posisi permukaan amplop pahat selama proses pemesinan sulit ditentukan. Hal ini menyebabkan waktu komputasi meningkat. Sedangkan vektor diskrit pada metode DVV memiliki arah yang sama yaitu sepanjang sumbu Z pada sistem koordinat kartesian. Arah vektor tidak tergantung dari bentuk permukaan benda kerja seperti yang terlihat pada Gambar 4-1b.



Gambar 4-1 Representasi Permukaan Benda Kerja dengan Metode a) Vektor Normal dan b) Vektor Vertikal

Mesin *milling* 5 sumbu biasanya digunakan untuk menghasilkan benda dengan bentuk permukaan yang rumit. Sehingga permukaan benda kerja bisa saja memiliki dinding vertikal atau sudut yang tajam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2a. Metode DNV dapat merepresentasikan bentuk permukaan yang rumit dan fitur yang terdapat pada produk dengan sangat baik, sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-2b. Meskipun metode DVV kurang akurat dalam merepresentasikan bentuk permukaan, khususnya pada dinding vertikal dan sudut yang tajam, namun waktu komputasi lebih cepat dan lokalisasi amplop pahat lebih mudah. Untuk permukaan yang halus dan sederhana maka penggunaan DVV lebih tepat karena lebih efisien sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 4-2c.

Dalam buku ini akan diuraikan metode vektor diskrit yang dikembangkan oleh Park dkk. [12]. Metode yang dikembangkan merupakan metode hibrid yang menggabungkan penggunaan DVV dan DNV secara bersamaan. Bagian permukaan yang halus direpresentasikan menggunakan DVV. Sedangkan bagian khusus permukaan benda kerja seperti dinding vertikal, sudut yang tajam serta fitur-fitur lainnya, direpresentasikan menggunakan DNV. Dengan cara ini maka keunggulan metode DVV dalam hal proses simulasi yang cepat tetap dapat dipertahankan. Di samping itu, akurasi untuk bagian yang rumit dari benda kerja dapat ditingkatkan.



Gambar 4-2 Metode Vektor Diskrit, a) Bentuk dan Fitur Produk, b) Model DVV, c) Model DNV, d) Konsep Hibrid

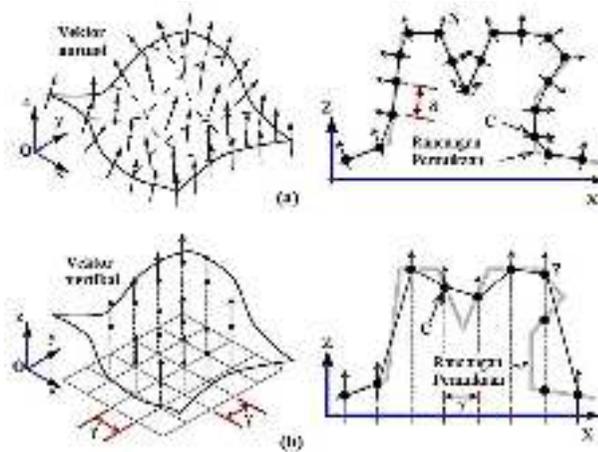
#### 4.1. Strategi Pemodelan untuk Benda Kerja dengan Fitur Khusus

Setiap vektor yang berada pada permukaan benda kerja memiliki posisi masing-masing ( $C$ ), arah ( $N$ ) dan panjang ( $L$ ).  $C$  adalah titik koordinat yang terletak pada permukaan produk yang akan dihasilkan dan  $N$  adalah vektor normal satuan pada titik  $C$ . Sedangkan  $L$  adalah panjang vektor yang diukur sepanjang  $N$  dari permukaan produk hingga permukaan benda kerja. Nilai  $L$  positif menunjukkan bahwa masih terdapat material yang harus dipotong untuk menghasilkan bentuk produk yang diinginkan. Di sisi lain, nilai  $L$  negatif menunjukkan bahwa terjadi pemotongan berlebih (*overcut*), atau terdapat bagian pahat yang menyentuh permukaan produk sehingga terjadi *gouging*. Setiap vektor diskrit dilambangkan dengan  $v_k = (C, N, L)_k$  dan kumpulan seluruh vektor disimbolkan dengan  $V_k = \{v_k; k = 1, \dots, n\}$

Model DNV terdiri dari vektor normal yang masing-masing arahnya belum tentu sama. Jarak antara vektor ( $\delta$ ) kemungkinan juga berbeda tergantung kondisi permukaan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-3a. Sedangkan pada model DVV, semua vektor terletak pada arah yang sama tanpa mempertimbangkan arah permukaan produk yang dihasilkan. Selain itu, posisi titik  $C$  pada bidang- $xy$  dapat diatur seperti bentuk segiempat sehingga jaraknya ( $\gamma$ ) sama sebagaimana terlihat pada Gambar 4-3b. Arah dan jarak vektor yang teratur menyebabkan DVV menjadi metode yang efisien dalam menurunkan waktu komputasi.

Dengan karakteristik yang dimiliki model DVV, maka dibutuhkan jarak antara vektor yang kecil agar dapat merepresentasikan dinding vertikal atau sisi tajam sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-3b. Hal ini tentunya akan berdampak terhadap jumlah data yang dibutuhkan dan pada akhirnya

mengakibatkan waktu komputasi menjadi lebih panjang. Sedangkan sisi menggantung seperti yang terlihat pada Gambar 4-2 dan Gambar 4-3 sulit direpresentasikan menggunakan DVV. Sehingga makin jelas bahwa DNV lebih sesuai untuk merepresentasikan bentuk dan fitur tersebut dibanding DVV.



Gambar 4-3 Skema Model a) DNV dan b) DVV

Terdapat beberapa langkah yang dilakukan dalam menentukan jenis vektor yang digunakan pada metode hibrid yang dikembangkan oleh Park dkk. [12] Langkah-langkah tersebut digunakan untuk produk pemesinan yang memiliki fitur dan bentuk khusus sebagaimana dijelaskan sebelumnya, dan diatur sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi dinding vertikal, sudut tajam, dan sisi menggantung pada produk yang akan dimesin seperti terlihat pada Gambar 4-2a.
2. Semua fitur dan bentuk khusus produk dikonversi ke dalam DNV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2b.

3. Seluruh permukaan produk dikonversi ke dalam DVV seperti terlihat pada Gambar 4-2c.

Cara mudah dalam mengidentifikasi fitur adalah dengan menginvestigasi vektor normal dari faset planar untuk permukaan produk yang dirancang. Sudut tajam diidentifikasi dengan cara membandingkan dua buah vektor normal dari faset yang saling berdekatan. Untuk sisi menggantung diidentifikasi dengan cara melihat arah sumbu Z vektor normal. Jika sumbu Z bernilai negatif berarti bahwa produk memiliki fitur sisi menggantung. Sedangkan dinding vertikal diperiksa dengan cara membandingkan sudut miring  $\theta$  dengan nilai acuan  $\theta_V$ . Sebuah titik pada permukaan produk menjadi bagian dari dinding vertikal ketika  $\theta > \theta_V$ . Untuk menentukan  $\theta_V$  akan dibahas pada subbab berikutnya.

Ketika semua area permukaan sudah diidentifikasi, maka area tersebut dikonversi ke dalam bentuk vektor diskrit. Dalam implementasinya, semua titik pada permukaan yang telah didiskritisasi akan disimpan dalam bentuk informasi  $C$ ,  $N$ , dan  $L$ . Gambar 4-2d menunjukkan model konsep hibrid di mana DNV dan DVV digabungkan.

#### 4.1.1. Parameter Akurasi

Terdapat dua isu penting dalam studi terkait model geometri, yang pertama adalah waktu komputasi, dan yang kedua adalah akurasi. Telah dibahas sebelumnya bahwa metode vektor diskrit memiliki keunggulan dalam hal waktu komputasi dibanding dengan model solid. Oleh karena itu maka penting untuk membahas isu terkait akurasi dari model DVV dan DNV yang dilihat dari dua sisi, representasi dan simulasi. Akurasi dalam hal representasi menjelaskan tentang perbedaan bentuk geometri antara permukaan yang dirancang dengan permukaan diskrit. Sementara akurasi dalam

hal simulasi adalah perbedaan antara proses pemotongan benda kerja yang diharapkan dan hasil simulasi.

Secara sederhana akurasi representasi ( $\varepsilon_R$ ) adalah berhubungan dengan  $\delta$  dan  $\gamma$  seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut,

$$\delta = 2\sqrt{2 \cdot \rho \cdot \varepsilon_R - \varepsilon_R^2} \quad (4-1)$$

$$\gamma = \delta \cdot \cos \theta \quad (4-2)$$

di mana  $\rho$  adalah radius kurvatur pada titik  $C$  dan  $\theta$  adalah sudut miring yang diukur dari bidang horizontal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-4a. Oleh karena itu maka jarak antara titik sampel pada permukaan rancangan untuk DNV tidak boleh melebihi  $\delta$ . Sedangkan untuk DVV tidak boleh melebihi dari  $\gamma$ .

Pada sisi lain, akurasi simulasi ( $\varepsilon_S$ ) merupakan akurasi terkait proses pemotongan. Sehingga untuk mengukurnya perlu mempertimbangkan bentuk dan pergerakan pahat. Akurasi simulasi dihitung menggunakan rumus berikut,

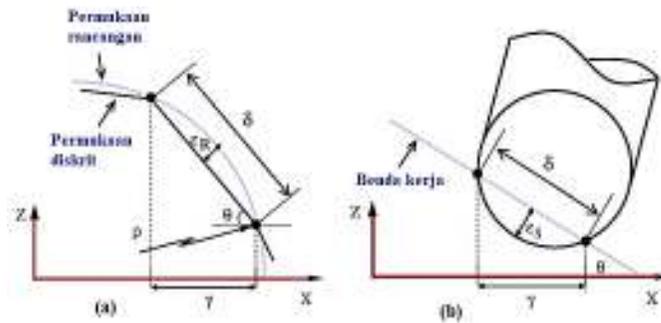
$$\delta = \sqrt{6 \cdot R \cdot \varepsilon_S - \varepsilon_R^2} \quad (4-3)$$

$$\gamma = \delta \cdot \cos \theta = \sqrt{6 \cdot R \cdot \varepsilon_S - \varepsilon_R^2} \cdot \cos \theta \quad (4-4)$$

di mana  $R$  adalah diameter pahat seperti yang terlihat pada Gambar 4-4b.

Untuk nilai  $R$  dan  $\varepsilon_S$  yang diberikan, maka nilai  $\delta$  untuk metode DNV seharusnya lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari Persamaan (4-1) dan Persamaan (4-3). Untuk menentukan nilai  $\gamma$  dari model DVV pada Persamaan (4-4), nilai  $\theta$  diatur sebagai  $\theta_V$ . Sebagaimana disebutkan pada subbab sebelumnya, sebuah titik pada permukaan rancangan menjadi milik dinding vertikal jika  $\theta > \theta_V$ . Oleh karena itu maka  $\theta_V$  merupakan ambang batas dalam menentukan apakah sebuah permukaan

curam atau tidak. Permukaan dinyatakan tidak curam jika  $\theta \leq \theta_V$ . Untuk kondisi ini maka permukaan dapat direpresentasikan menggunakan DVV secara akurat dengan  $\gamma = \delta \cdot \cos \theta_V$ .



Gambar 4-4 Analisis Akurasi, a) Akurasi Representasi, dan b) Akurasi Simulasi

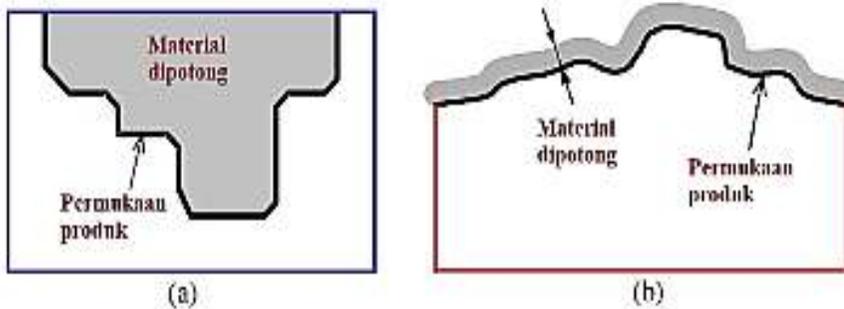
Dalam praktiknya, nilai  $\theta_V$  yang menghasilkan sudut kemiringan maksimum ( $\theta_{max}$ ) masih perlu dicari.  $\theta_{max}$  diperlukan sebagai input dalam menentukan permukaan rancangan karena  $\theta_{max}$  akan menghasilkan  $\gamma$  tak terhingga sehingga membutuhkan jumlah memori yang tidak realistis. Perlu diingat bahwa jumlah memori yang dibutuhkan untuk metode DVV adalah senilai  $\gamma^2$ . Oleh karena itu maka jumlah memori yang dibutuhkan ( $\gamma = \gamma_m$ ) perlu ditentukan di awal. Sehingga nilai  $\theta_V$  yang menghasilkan jumlah data yang realistis dapat dihitung sebagai berikut,

$$\theta_V = \cos^{-1} \left( \frac{\gamma_m}{\delta} \right) \quad (4-5)$$

#### 4.1.2. Model Benda Kerja Awal

Secara umum terdapat dua tipe bentuk permukaan benda kerja awal (*initial workpiece*), yaitu tipe blok (*solid block*) dan *casting*. *Solid*

*block* adalah benda kerja yang biasanya berbentuk segi empat dan umumnya digunakan untuk membuat cetakan mesin *injection molding*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-5a. Sedangkan *casting* adalah benda kerja awal yang merupakan hasil dari proses pengecoran logam. Benda kerja *casting* biasanya sudah berbentuk seperti produk akhir sebagaimana terlihat pada Gambar 4-5b. Proses pemesinan yang dilakukan pada benda kerja *casting* hanya merupakan proses *finishing* untuk memperoleh permukaan yang halus.



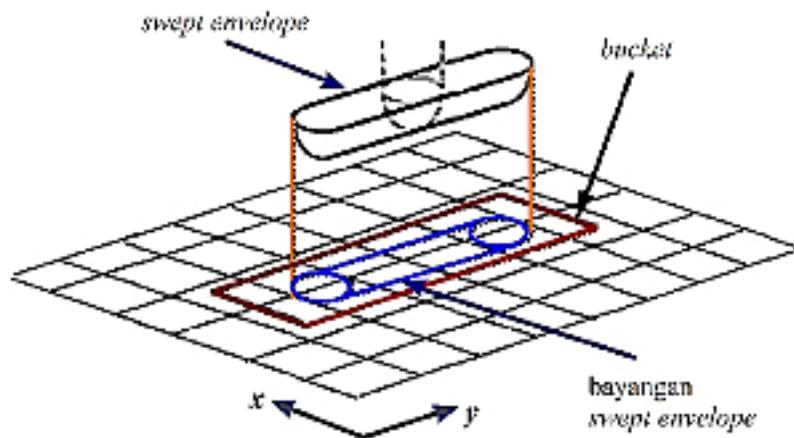
Gambar 4-5 Tipe Benda Kerja Awal, a) Tipe Casting, dan b) Tipe Blok

Dalam menentukan bentuk permukaan benda kerja, langkah pertama yang dilakukan adalah mengidentifikasi bentuk fitur pada permukaan produk yang akan dikembangkan. Dalam proses identifikasi ini akan diperoleh informasi apakah terdapat permukaan dinding vertikal, sudut tajam, atau sisi menggantung. Langkah berikutnya adalah mengonversi semua permukaan produk ke dalam model DVV dengan jarak  $\gamma$  yang telah dihitung sebelumnya. Setiap vektor diskrit disusun secara teratur pada bidang  $xy$ , dan panjang vektor  $L$  ditentukan di mana ujung dari vektor terletak pada permukaan benda kerja. Kemudian fitur-fitur

husus produk dikonversikan ke dalam model DNV dengan jarak  $\delta$  sesuai hasil yang ditetapkan.

Panjang  $L$  awal yang wajar dari vektor DNV untuk benda kerja tipe *casting* merupakan sisa material yang harus dipotong seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-5b. Namun untuk benda kerja tipe blok memerlukan strategi yang berbeda dalam memilih panjang  $L$ , kecuali semua vektor yang digunakan adalah DVV. Strategi yang sama dapat diterapkan dalam proses pemesinan kasar (*roughing milling*) di mana proses pemesinan harus menyisakan sebagian material untuk tahap akhir (*finishing*).

Model DVV yang diterapkan untuk semua permukaan biasanya lebih mudah dalam mendeteksi terjadinya tabrakan antara pahat dan benda kerja karena komputasinya lebih cepat. Kondisi lainnya yang tidak membutuhkan model DNV adalah proses pemesinan kasar. Pada pemesinan kasar biasanya menyisakan sedikit material untuk proses pemesinan akhir.



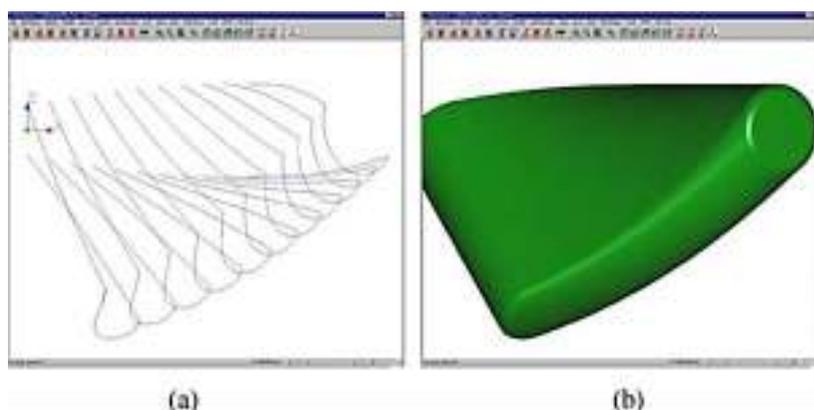
Gambar 4-6 Lokalisasi Vektor pada Mesin 5 Sumbu

### 4.1.3. Menentukan Persinggungan *Swept Envelope* dan Vektor Diskrit

Dalam proses simulasi, identifikasi perpotongan antara *swept envelope* pahat dan vektor diskrit merupakan proses yang harus dilakukan berulang-ulang dan menyita waktu paling banyak. Waktu komputasi menjadi sangat panjang jika harus memeriksa seluruh vektor untuk setiap perpindahan pahat. Oleh karena itu maka perlu dilakukan lokalisasi vektor yang berpotensi bersinggungan dengan *swept envelope*, atau disebut sebagai *bucket*.

*Bucket* merupakan area berbentuk segi empat pada bidang  $xy$  yang berisi kumpulan vektor yang berpotensi bersinggungan dengan *swept envelope*. Ukuran *bucket* ditentukan dengan cara memproyeksikan bentuk *swept envelope* ke bidang  $xy$  sehingga terbentuk bayangan *swept envelope*. *Swept envelope* merupakan bidang yang dibentuk oleh pergerakan pahat untuk setiap NC-*block*. Namun mengingat bahwa orientasi pahat yang sangat kompleks pada mesin 5 sumbu, maka ukuran *bucket* diperluas dari bayangan *swept envelope* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4-6. Dengan cara ini maka proses komputasi untuk memeriksa persinggungan antara pahat dan benda kerja hanya dilakukan pada vektor yang terdapat dalam *bucket*.

*Swept envelope* untuk setiap NC-*block* dibentuk dari kurva siluet yang dibentuk dari titik *grazing* pahat dan dikombinasikan dengan *ruled surface* yang menghubungkan antar siluet pahat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-7. Selanjutnya *swept surface* didiskritisasi menggunakan faset segitiga di mana setiap faset memiliki vektor normal.



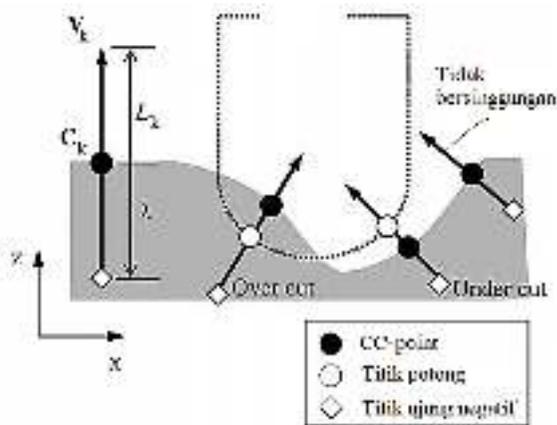
Gambar 4-7 Representasi Pahat, a) Kurva Siluet, dan b) *Swept Envelope*

Setiap faset dari *swept envelope* direpresentasikan dengan  $F = \{f; i = 1, \dots, m\} = \{(T, N)_i\}$ . Sedangkan kumpulan vektor diskrit disimbolkan dengan  $V = \{v_k; k = 1, \dots, n\} = \{(C, N, L)_k\}$ , di mana  $L_k$  adalah panjang  $v_k$  saat ini yang diukur dari  $C$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-8. Cara menentukan  $L_k$  telah diuraikan pada subbab 4.1.2. Panjang  $L_k$  akan berkurang ketika  $v_k$  dipotong oleh *swept envelope*. Selanjutnya  $L_k$  diperiksa untuk menentukan apakah terjadi *overcut* ( $L_k < 0$ ) atau *undercut* ( $L_k > 0$ ). Untuk informasi bahwa nilai  $\lambda$  bernilai tetap dalam menentukan titik ujung negatif dari  $v_k$ .

Selanjutnya adalah menentukan apakah terjadi persinggungan antara facet ke- $i$  ( $f_i$ ) dan vektor ke- $k$  ( $v_k$ ). Perlu dicatat bahwa  $v_k$  secara geometri identik dengan sebuah garis tiga dimensi di mana persamaan parametriknya adalah,

$$P(t) = C_k + tN_k; \lambda \leq t \leq L_k \quad (2-6)$$

di mana  $\lambda$  nilainya negatif dan lebih kecil dari  $L_k$ .



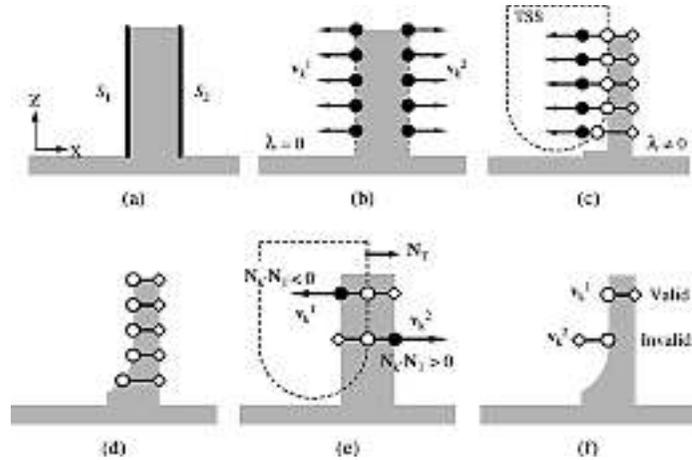
Gambar 4-8 Persinggungan *Swept Envelope* dan Vektor

Jika persinggungan antara *swept envelope* dan vektor terjadi pada  $t = \omega$  yang terletak di antara  $f_i$  dan garis  $P(t)$  dengan  $-\infty < t < +\infty$ , maka terdapat tiga kemungkinan kondisi, yaitu, a)  $\omega \geq L_k$ , b)  $\omega \leq \lambda$ , dan c)  $\lambda < \omega < L_k$ . Kondisi (a) dan (b) adalah kondisi ketika  $f_i$  tidak bersinggungan dengan  $v_k$ . Sedangkan untuk kondisi (c), titik potong  $P(\omega) = C_k + \omega N_k$  dan  $L_k$  diganti dengan  $\omega$  untuk menggambarkan perpotongan ini. Model benda kerja akhir dapat diperoleh dengan mengulang proses pengujian yang sama untuk  $F$  dan  $V$  pada semua *NC-block*.

#### 4.1.4. Validasi Perpotongan Pahat dan Benda Kerja

Validitas perpotongan antara *swept envelope* dan vektor dalam beberapa kondisi perlu dilakukan pengecekan. Sebagai contoh, dua permukaan  $S_1$  dan  $S_2$  pada Gambar 4-9a dikonversikan menjadi vektor diskrit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-9b.  $v_k^1$  adalah vektor diskrit pada permukaan  $S_1$ , sedangkan  $v_k^2$  adalah vektor diskrit pada permukaan  $S_2$ .

Kondisi proses pemotongan terjadi di mana nilai  $\lambda \neq 0$  ditunjukkan pada Gambar 4-9c. Untuk penyederhanaan ilustrasi maka vektor pada permukaan  $S_2$  tidak ditampilkan. Benda kerja hasil dari perpotongan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4-9d. Meskipun proses pemotongan terjadi pada permukaan  $S_1$ , namun persinggungan antara  $v_k^2$  dan pahat mungkin saja terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-9e. Kondisi ini yang harus divalidasi untuk menentukan kondisi pemotongan yang benar. Perpotongan antara pahat dan vektor dinyatakan valid jika  $N_k \cdot N_T < 0$ , di mana  $N_T$  adalah vektor normal dari faset  $f_i$  yang bersinggungan dengan  $v_k$ . Contoh pada Gambar 4-9f menunjukkan bahwa  $v_k^1$  valid sedangkan  $v_k^2$  tidak valid.

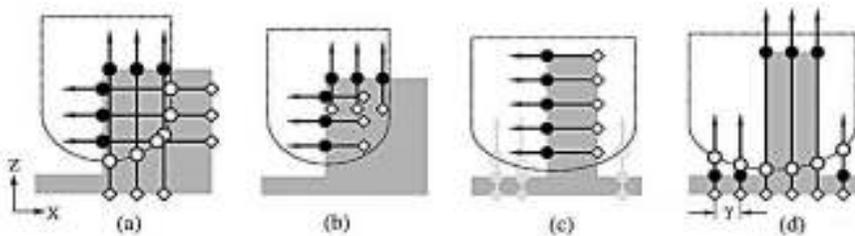


Gambar 4-9 Validasi Perpotongan Antara *Swept Envelope* dan Vektor

Nilai parameter  $L$  dari setiap vektor diskrit harus diperbaharui setiap kali batas proses pemotongan terjadi untuk memperoleh data benda kerja dalam proses (*in-process workpiece*). Namun perlu hati-hati dalam menentukan nilai negatif dari setiap

vektor ( $\lambda$ ).  $\lambda$  dapat bernilai hingga (*finite*) maupun tak hingga (*infinite*). Jika bernilai tak hingga maka hasil yang valid secara logis dapat diperoleh, namun berdampak pada kecepatan komputasi yang menurun. Jika bernilai hingga maka kemungkinan terjadi perpotongan pahat dan vektor secara tidak normal.

Idealnya  $\lambda$  bernilai hingga karena ujung negatif vektor diskrit seharusnya mencapai hingga batas luar benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-10a. Jika tidak maka titik potong tidak bisa dideteksi seperti yang terlihat pada Gambar 4-10. Namun mungkin saja terjadi proses abnormal meskipun ujung negatif sudah berada pada dinding luar benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-10c. Pada kondisi ini seluruh vektor diskrit dipotong secara sempurna meskipun tidak ada titik persinggungan antara pahat dan vektor diskrit.



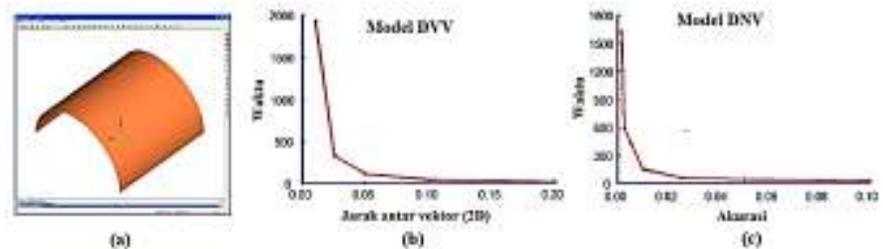
Gambar 4-10 Kondisi Ketika  $\lambda$  Bernilai Hingga, a) Proses Normal, b) Proses Abnormal, c) Kondisi Pemotongan Sempurna, d) Suplemen Model DVV

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa seluruh permukaan produk dikonversi ke dalam model DVV pada bidang  $x$ - $y$ . Selanjutnya diikuti dengan model DNV jika memang dibutuhkan. Oleh karena itu maka bidang segi empat pada Gambar 4-10c tidak hanya direpresentasikan oleh DNV, namun juga oleh DVV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-10d. Dapat dilihat

bahwa perpotongan antara pahat dan DVV memberikan hasil yang benar. Namun perlu dicatat bahwa kesalahan dapat terjadi dengan tingkat kesalahan tergantung pada besar nilai  $\gamma$  dari dinding vertikal. Semakin kecil nilai  $\gamma$  maka menyebabkan jumlah vektor yang digunakan semakin banyak. Nilai  $\gamma$  yang kecil akan menghasilkan tingkat kesalahan yang kecil juga. Kondisi sebaliknya akan terjadi di mana nilai  $\gamma$  yang besar akan menghasilkan tingkat kesalahan yang besar juga.

#### 4.1.5. Implementasi pada Bentuk Silinder

Metode hibrid yang dikembangkan telah diimplementasikan pada berbagai bentuk benda kerja dan produk yang akan dihasilkan. Produk berbentuk setengah silinder dengan radius 50 mm dan bidang  $xy$  100x100 mm ditunjukkan pada Gambar 4-11a. Simulasi dilakukan menggunakan pahat bola dengan pemesinan 3 sumbu dan menghasilkan 21.500 NC-block. Waktu komputasi untuk proses simulasi menggunakan DVV disajikan pada Gambar 4-11b dan menggunakan DNV pada Gambar 4-11c.



Gambar 4-11 Implementasi Model, a) Permukaan Setengah Silinder, b) Waktu Komputasi Model DVV Murni, c) Waktu Komputasi Waktu DNV Murni

Tabel 4-1 menunjukkan hasil dari proses simulasi pemotongan menggunakan metode hibrid dengan tingkat akurasi 0,0025. Simulasi pemotongan dilakukan empat kali di mana masing-masing menggunakan  $\theta_V$  dan  $\gamma$  yang berbeda-beda. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa waktu simulasi bervariasi tergantung dari  $\theta_V$  dan atau  $\gamma$  di mana waktu yang paling singkat adalah 243 detik. Waktu ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan model DNV murni maupun DVV murni seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-11.

Dibutuhkan waktu 1930 detik untuk simulasi menggunakan metode DVV murni dengan  $\gamma = 0,01$  dan  $\theta_V = 88^\circ$ . Metode DVV murni selain membutuhkan waktu yang lebih lama juga memiliki kelemahan di mana pada kenyataan permukaan produk memiliki dinding vertikal. Sedangkan metode DNV murni membutuhkan waktu 586 detik dengan  $\varepsilon = 0,0025$ . Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa pemilihan  $\theta_V$  perlu dilakukan dengan cermat. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa jarak spasi  $\gamma$  yang lebih besar akan menghasilkan kinerja yang lebih baik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-11a.

Tabel 4-1 Waktu Simulasi Menggunakan Metode Hibrid ( $\varepsilon = 0,001$  dan  $\delta = 0,173$ )

Tes No.	1	2	3	4
Total waktu (s)	570	243*	318	735
DVV [ $\gamma$ ]	555 [0,025]	218 [0,04]	128 [0,05]	47 [0,1]
DNV part [ $\theta_V$ ]	15 [81,7]	92 [76,5]	190 [73,2]	688 [54,6]

#### 4.1.6. Implementasi pada Cetakan *Injection Molding*

Pada subbab ini akan ditunjukkan hasil simulasi proses pemesinan untuk membuat sebuah cetakan penutup televisi yang akan digunakan pada mesin *injection molding*. Benda kerja awal yang

digunakan berbentuk balok dan ukuran produk adalah 1000 x 955 x 340 mm. Permukaan produk memiliki 569 sisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-12a. Rancangan produk juga memiliki sisi berupa dinding vertikal.

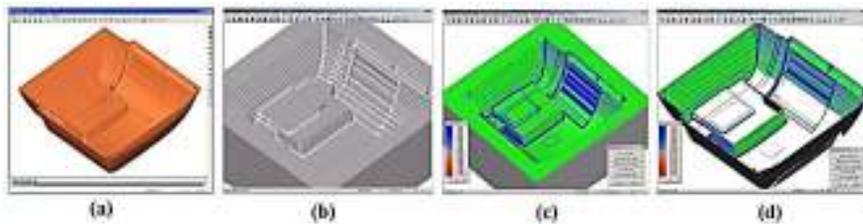
Proses pemesinan dilakukan dua tahap yaitu proses pemesinan kasar (*rough milling*) dan proses pemesinan akhir (*finish milling*). Pemesinan kasar menggunakan sebagian besar dengan metode DVV. Metode DNV digunakan hanya pada dinding vertikal di mana  $\theta_V = 79,5$  dan panjang vektor awal  $L$  diatur sebesar 2mm. Proses pemesinan menggunakan pahat bola dengan diameter 30 mm sehingga proses pemesinan menghasilkan 78.524 NC-*block*. Simulasi proses pemesinan kasar menggunakan metode DVV memakan waktu komputasi selama 87 detik dan hasilnya disajikan pada Gambar 4-12b. Sedangkan hasil simulasi proses pemesinan akhir menggunakan metode hibrid disajikan pada Gambar 4-12c.

Tabel 4-2 Waktu Simulasi untuk Metode Hibrid ( $\varepsilon = 0,005$  dan  $\delta = 0,387$ )

	Waktu (detik)	Jumlah Vektor	Memori (MB)
Total waktu (s)	943	67.981.291	286
Bagian DVV	710	67.368.000	269
Bagian DNV	233	6.130.291	17

Tabel 4-2 merangkum hasil simulasi metode hibrid untuk proses pemesinan akhir dengan parameter  $\varepsilon = 0,005$ ,  $\theta_V = 79,5$ , dan  $\gamma = 0,1$ . Waktu total yang dihabiskan untuk proses komputasi adalah 943 detik dan membutuhkan memori sebanyak 286 MB. Sebagai perbandingan bahwa jika proses yang sama menggunakan DNV murni, maka dibutuhkan waktu 1870 detik meskipun dengan tingkat akurasi yang lebih rendah, yaitu  $\varepsilon = 0,01$ . Selain itu, jika menggunakan metode DVV murni maka diperkirakan akan

membutuhkan waktu yang lebih lama dan memori yang lebih besar. Meskipun dengan  $\gamma = 0,05$  (atau sebanding dengan  $\varepsilon = 0,005$  dan  $\theta_V = 84,8$ ), waktu komputasi DVV murni yang dihasilkan lebih dari 1700 detik dan diperkirakan menghabiskan memori sebesar 1079 MB.



Gambar 4-12 a) Rancangan Produk, b) Pemesinan Kasar Menggunakan DVV Murni, c) Pemesinan Akhir Model Hibrid dan, d) Sisi yang Menggunakan DNV

# BAB 5.

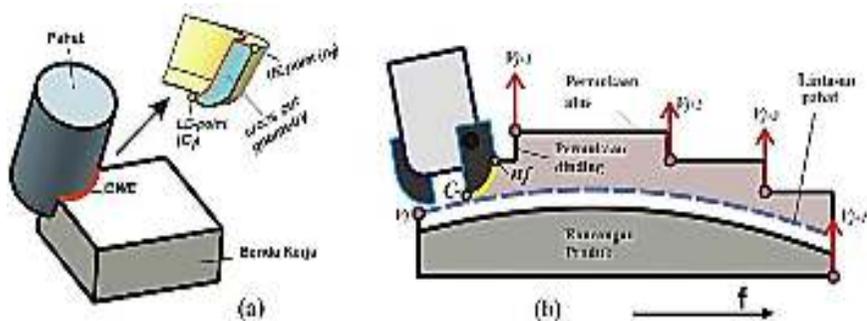
## METODE ANALITIS UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA PEMESINAN SEMIHALUS 5 SUMBU

Model solid terbukti mampu memberikan hasil yang akurat dalam melakukan simulasi proses pemesinan. Benda kerja dalam bentuk 3D dapat direpresentasikan dengan mudah, presisi dan akurat. Namun selain memiliki berbagai keunggulan tersebut, metode ini juga memiliki kelemahan, yaitu waktu komputasi yang lama. Waktu komputasi yang lama disebabkan karena proses pengecekan persinggungan antara pahat dan benda kerja dilakukan menggunakan prinsip perpotongan antara permukaan dengan permukaan (*surface-surface intersection*). Semakin kompleks proses pemesinan yang dilakukan seperti pada pemesinan 5 sumbu, maka semakin lama waktu yang dibutuhkan.

Oleh karena itu maka sebagian peneliti mengembangkan metode vektor diskrit sebagaimana yang diuraikan pada BAB 4. Metode vektor diskrit terbukti mampu menjawab kelemahan model solid dalam hal waktu komputasi. Hal ini disebabkan karena persinggungan antara pahat dan benda kerja dihitung menggunakan prinsip perpotongan antara permukaan dan vektor (*surface-vector intersection*). Namun kelemahan metode vektor diskrit

dibanding dengan model solid adalah tingkat akurasi yang lebih rendah. Kelemahan ini dapat diatasi dengan memperkecil jarak antara vektor sehingga jumlah vektor diskrit yang digunakan untuk merepresentasikan permukaan menjadi bertambah. Hanya saja peningkatan jumlah vektor berdampak pada waktu komputasi yang semakin lama sebagaimana yang disajikan pada Tabel 4-2.

Oleh karena itu maka beberapa peneliti mengembangkan metode analitis untuk menghitung geometri persinggungan antara pahat dan benda kerja. Ozturk dan Lazoglu [13] mengembangkan studi untuk menentukan geometri tatal hasil dari persinggungan antara pahat bola dan benda kerja. Geometri tatal untuk setiap pergerakan pahat dihitung dengan cara menentukan tiga batas persinggungan pahat dan benda kerja, yaitu batas benda kerja (batas 1), batas persinggungan awal (batas 2), dan batas persinggungan akhir (batas 3). Metode yang dikembangkan cepat dan akurat, namun hanya bisa diterapkan pada mesin freis 3 sumbu.



Gambar 5-1 a) Geometri Tatal, b) Tipe Permukaan Benda Kerja untuk Pemesinan Freis *Semi-Finish*

Studi lain yang menggunakan metode analitis dilakukan oleh Tunc dan Budak [13]. Mereka mengembangkan sebuah metode

analitis sederhana yang diberi nama *bounding point coordinate*. Dengan metode ini maka dalam pemakanan (*depth of cut*) untuk setiap pergerakan pahat dapat dihitung berdasarkan koordinat *CC-point*. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan mampu menghitung kedalaman pemotongan (*depth of cut*) dengan tepat. Hanya saja metode ini hanya bisa diterapkan pada benda kerja berbentuk balok atau pada permukaan datar. Ketika bentuk permukaan benda kerja kompleks, maka digunakan metode diskrit untuk merepresentasikan permukaan benda kerja.

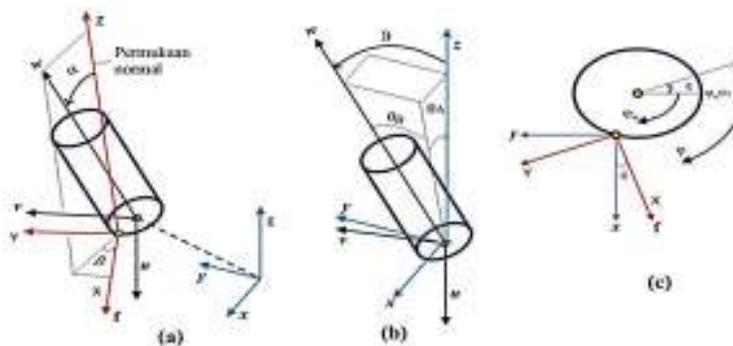
Dalam buku ini diuraikan metode analitis yang dikembangkan oleh Hendriko dkk.[15], yang disebut dengan *Analytical Boundary Simulation* (ABS). Metode ini bertujuan untuk menghitung panjang tatal (*length of cut*) pada setiap posisi pahat. Panjang tatal dihitung dengan terlebih dahulu menentukan koordinat titik persinggungan pahat dan benda kerja pada bagian bawah, atau disebut *lower engagement point* (LE-point), dan koordinat titik persinggungan pahat dan benda kerja pada bagian atas, atau disebut *upper engagement point* (UE-point). Kontak antara pahat dan benda kerja akan menghasilkan geometri tatal seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5-1a. Pahat yang digunakan pada metode ini adalah pahat toroidal dan pahat datar. Metode yang dikembangkan pada bagian ini khusus untuk pemesinan freis *semi-finish* dengan kondisi permukaan benda kerja seperti tangga sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 5-1b.

### 5.1. Menentukan Sistem Koordinat dan Bentuk Pahat

Pada mesin 5 sumbu, pahat dapat bergerak secara fleksibel sehingga dapat diorientasikan ke berbagai arah. Metode yang dikembangkan adalah untuk mesin dengan tipe *spindle tilting* di mana dua sumbu rotasi terletak pada pergerakan pahat. Agar

pergerakan pahat yang sangat dinamis dapat dihitung secara analitis, maka mekanisme transformasi sistem koordinat perlu dibangun terlebih dahulu. Terdapat tiga sistem koordinat yang digunakan dalam metode ini, yaitu sistem koordinat benda kerja (*workpiece coordinate system*) atau disingkat WCS, sistem koordinat pahat (*tool coordinate system*) atau disingkat TCS, dan sistem koordinat lokal (*local coordinate system*) atau LCS. Ketiga sistem koordinat tersebut disajikan pada Gambar 5-2.

WCS adalah sistem koordinat global yang representasikan dengan vektor  $x, y, z$ . Sementara TCS dan LCS secara berurutan dilambangkan dengan  $u, v, w$  dan  $X, Y, Z$ . Sudut inklinasi pahat ( $\alpha$ ) atau di beberapa referensi disebut juga *lead angle*, dan sudut sekrup ( $\beta$ ) atau disebut juga *tilt angle*, biasanya digunakan ketika permukaan produk yang dihasilkan sangat kompleks. Kedua sudut tersebut dibentuk oleh TCS dan LCS seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5-2a. Sedangkan orientasi pahat relatif terhadap WCS ( $\theta$ ) dihitung menggunakan orientasi pahat relatif terhadap sumbu- $x$  ( $\theta_A$ ) dan sumbu- $y$  ( $\theta_B$ ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-2b.



Gambar 5-2 Sistem Koordinat, a) Tiga Sistem Koordinat, b) Orientasi Pahat Relatif Terhadap WCS, dan c) Sudut Persinggungan ( $\varphi$ ) dan Sudut Persinggungan Awal ( $\varepsilon$ )

$$\vartheta = \cos^{-1}(\cos \theta_A \cos \theta_B) \quad (5-1)$$

Operator [M] digunakan untuk transformasi sistem koordinat dari TCS ke WCS, yang meliputi perputaran pahat pada sumbu- $x$  dan sumbu- $y$ , serta translasi pada titik  $T$ . Adapun persamaan untuk menentukan operator [M] adalah sebagai berikut,

$$[M] = Rot(X, \theta_A) \cdot Rot(Y, \theta_B)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_B & 0 & \sin \theta_B & x_T \\ \sin \theta_A \sin \theta_B & \cos \theta_A & -\sin \theta_A \cos \theta_B & y_T \\ \cos \theta_A \sin \theta_B & \sin \theta_A & \cos \theta_A \cos \theta_B & z_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

di mana  $T(x_T, y_T, z_T)$  adalah CL-*point* yang terletak pada titik pusat bagian bawah pahat. Sumbu koordinat TCS dengan basis vektor  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ditentukan sebagai berikut,

$$w = [M] [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$$

$$= [\sin \theta_B \quad -\sin \theta_A \cos \theta_B \quad \cos \theta_A \cos \theta_B]^T \quad (5-3)$$

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

di mana  $V_T$  adalah kecepatan linear dari satu CC-*point* ke CC-*point* berikutnya.  $V_T$  dihitung menggunakan rumus berikut,

$$V_T = \frac{C_{C(i+1)} - C_{C(i)}}{f}; \quad \text{where } (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (5-4)$$

di mana  $C_C(x_{C_C}, y_{C_C}, z_{C_C})$  dan  $f$  secara berurutan adalah koordinat CC-*point* dan *feedrate*. Untuk menghitung geometri tatal pada posisi tertentu, maka lintasan pahat dapat diinterpolasi secara linear. Untuk setiap posisi dan orientasi pahat yang terletak di antara dua CC-*point* dapat dihitung menggunakan rumus berikut,

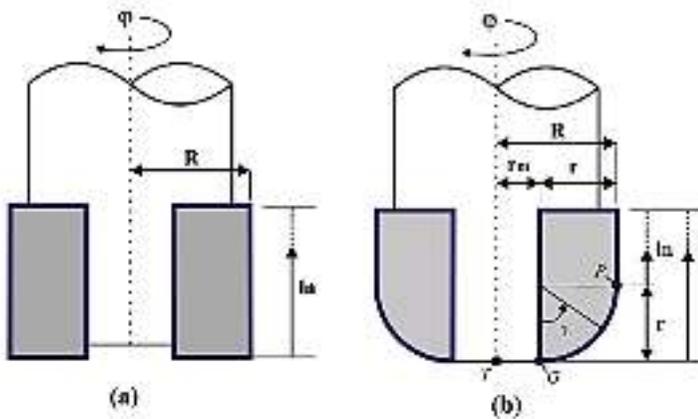
$$\begin{bmatrix} C_C \\ \theta_A \\ \theta_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{C(i)} \\ \theta_{A(i)} \\ \theta_{B(i)} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} C_{C(i+1)} - C_{C(i)} \\ \theta_{A(i+1)} - \theta_{A(i)} \\ \theta_{B(i+1)} - \theta_{B(i)} \end{bmatrix} \text{ where } (0 \leq p < 1) \quad (5-5)$$

di mana  $p$  menunjukkan parameter interpolasi lintasan pahat.

Arah gerakan pahat mempengaruhi permukaan pahat yang bersinggungan dengan benda kerja. Dalam pemesinan sebenarnya, pahat dapat diprogram agar dapat bergerak ke segala arah, terutama selama pemesinan dengan permukaan yang kompleks. Sudut persinggungan awal ( $\epsilon$ ) adalah persimpangan arah feedrate dari sumbu- $x$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-2c. Sudut ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$\epsilon = \tan^{-1} \left[ \frac{y_{C_C(i+1)} - y_{C_C(i)}}{x_{C_C(i+1)} - x_{C_C(i)}} \right] \quad (5-6)$$

di mana sudut rotasi pahat ( $\varphi$ ) adalah  $\varphi_0 - \epsilon$  dan  $\varphi_0 (0 < \varphi_0 < 180)$  adalah sudut rotasi ketika pahat bergerak lurus pada sumbu- $x$ .



Gambar 5-3 Parameter Geometri Pahat, a) Pahat Datar, dan b) Pahat Toroidal

Pahat yang digunakan pada metode yang dikembangkan adalah pahat datar dan pahat toroidal. Bentuk permukaan pahat datar dianggap sama dengan bentuk silinder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-3a, dan dihitung menggunakan persamaan parametris sebagai berikut,

$$S_c(\varphi; l) = \begin{bmatrix} R \sin \varphi \\ R \cos \varphi \\ l_n \end{bmatrix}; 0 < l_n < l \quad (5-7)$$

di mana  $R$  adalah radius pahat dan  $l_n$  adalah jarak tegak lurus dari dasar pahat terhadap sebuah titik sembarang pada permukaan pahat.  $l_n$  digunakan untuk mengukur panjang pahat pada pahat datar.

Sementara itu, bentuk geometri pahat toroidal dibentuk oleh dua buah permukaan, yaitu permukaan silinder dan permukaan toroidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-3b. Untuk menentukan bagian permukaan silinder maka digunakan Persamaan (5-7) dengan mengubah  $l = r + l_n$ . Sedangkan untuk permukaan toroidal didefinisikan menggunakan persamaan berikut,

$$S_T(\varphi; \lambda) = \begin{bmatrix} (r_m + r \sin \lambda) \sin \varphi \\ (r_m + r \sin \lambda) \cos \varphi \\ r - r \cos \lambda \end{bmatrix} \text{ where } 0 < \lambda < 90 \quad (5-8)$$

di mana  $r$  adalah radius minor pahat,  $r_m$  adalah radius mayor, dan  $\lambda$  adalah sudut toroidal.

Karena data NC dan informasi permukaan benda kerja disajikan dalam sistem koordinat WCS, maka permukaan pahat juga ditransformasi dari TCS ke WCS. Proses transformasi dilakukan menggunakan operator  $[M]$  pada Persamaan (5-2). Kemudian Persamaan (5-7) dan Persamaan (5-8) berubah menjadi,

$$S_c'(x'_{s_c}, y'_{s_c}, z'_{s_c}) = [M] S_c(\varphi; l) \quad (5-9)$$

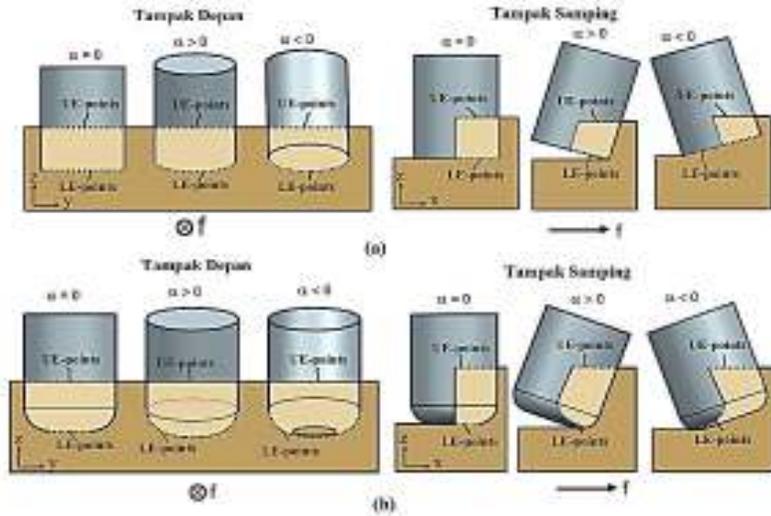
$$S_T'(x'_{S_T}, y'_{S_T}, z'_{S_T}) = [M] S_T(\varphi; \lambda) \quad (5-10)$$

## 5.2. Menentukan LE-Point

Menurut Gani dkk. [16] bahwa sudut inklinasi pahat yang biasa digunakan pada mesin freis 5 sumbu memberikan pengaruh yang besar pada geometri tatal. Hal ini tidak hanya berdampak pada ketebalan tatal (*cut thickness*), tapi juga pada panjang tatal (*cut length*). Dalam hal gaya potong, beberapa penelitian (Altintas dkk. [17]; Spence dkk. [7]; El-Mounayri [18]) menunjukkan bahwa sudut inklinasi negatif cenderung akan menghasilkan gaya potong lebih besar disebabkan bidang kontak antara pahat dan benda kerja semakin luas. Hal ini terjadi karena bidang kontak tidak hanya pada bagian depan pahat, namun kontak antara pahat dan benda kerja juga terjadi pada bagian belakang pahat.

LE-*point* untuk pahat datar sebagai pengaruh dari sudut inklinasi diilustrasikan pada Gambar 5-4a. Dapat dilihat bahwa LE-*point* berada pada bagian depan pahat ketika pahat tanpa sudut inklinasi ( $\alpha = 0$ ), atau ketika pahat dengan sudut inklinasi positif ( $\alpha > 0$ ). Sedangkan ketika sudut inklinasi bernilai negatif ( $\alpha < 0$ ), LE-*point* berada pada bagian belakang pahat. Koordinat LE-*point* ( $C$ ) dihitung menggunakan Persamaan (5-7) dengan  $l = 0$ .

Fenomena yang berbeda ditemukan ketika menggunakan pahat toroidal sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5-4b. Ketika orientasi pahat tanpa sudut inklinasi, maka LE-*point* untuk setiap sudut rotasi berada pada dasar pahat bagian depan dengan sudut toroidal sama dengan nol ( $\lambda = 0$ ). Namun pada saat sudut inklinasi digunakan, maka koordinat LE-*point* berubah secara signifikan. Ketika  $\alpha > 0$ , LE-*point* berada pada bagian depan pahat dengan  $\lambda > 0$ , sedangkan ketika  $\alpha < 0$ , LE-*point* berada pada bagian belakang pahat.



Gambar 5-4 Dampak Sudut Inklinasi Terhadap LE-point, a) Pahat Datar dan, b) Pahat Toroidal

Metode untuk menentukan LE-point pada pahat toroidal dikembangkan dari metode untuk menentukan titik *grazing* pada model solid sebagaimana yang telah diuraikan pada Subbab 3.1. Titik *grazing* diperoleh menggunakan fungsi tangen  $F_{(\vartheta, \varphi, p)} = N_{S_T(\vartheta, \varphi, p)} \cdot V_{S_T(\vartheta, \varphi, p)} = 0$ . Di mana  $F_{N(\vartheta, \varphi, p)}$  dan  $V_{S_T(\vartheta, \varphi, p)}$  secara berurut adalah vektor normal permukaan pahat dan vektor searah pergerakan pahat. Dengan metode yang sama, LE-point yang berada pada permukaan toroidal dapat ditentukan.

Vektor normal dari sebuah titik sembarang  $Q$  yang terletak pada permukaan toroidal terhadap sistem koordinat TCS dihitung sebagai berikut,

$$N_{S_T} = \frac{\partial S_T / \partial \lambda}{|\partial S_T / \partial \lambda|} \times \frac{\partial S_T / \partial \varphi}{|\partial S_T / \partial \varphi|} = \begin{bmatrix} \sin \lambda \cdot \cos \varphi \\ \sin \lambda \cdot \sin \varphi \\ -\cos \lambda \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

Ketika Persamaan (5-11) ditransformasikan ke LCS, maka persamaannya berubah menjadi,

$$N_{S_T'(\vartheta, \varphi, p)} = \sin \lambda \cdot \cos \varphi \cdot u + \sin \lambda \cdot \sin \varphi \cdot v - \cos \lambda \cdot w \quad (5-12)$$

Kecepatan sebuah titik sembarang ( $Q$ ) pada permukaan toroidal dihitung menggunakan rumus berikut,

$$V_{S_T} = V_T + \omega \times \overrightarrow{TQ} \quad (5-13)$$

di mana  $\omega$  adalah kecepatan angular dan  $\overrightarrow{TQ}$  merupakan vektor posisi dari  $T$  ke  $Q$ . Koordinat titik  $T$  dan orientasi pahat yang berada di antara dua *CC-point* dihitung menggunakan interpolasi linear sebagaimana yang dijelaskan pada Persamaan (5-5). Karena perubahan sudut orientasi pahat sudah ditentukan menggunakan interpolasi linear, maka dianggap  $\omega = 0$ . Oleh karena itu maka nilai vektor kecepatan di Persamaan (5-13) sama dengan  $V_T$ , dan persamaan fungsi tangen berubah menjadi,

$$F_{(\vartheta, \varphi, p)} = \sin \lambda \cdot \cos \varphi \cdot (V_T \cdot u) + \sin \lambda \cdot \sin \varphi \cdot (V_T \cdot v) + \cos \lambda \cdot (V_T \cdot w) = 0 \quad (5-14)$$

Akhirnya sudut toroidal *LE-point* untuk setiap sudut rotasi pahat dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\lambda_c = \tan^{-1} \left[ \frac{V_T \cdot w}{\cos(\varphi) \cdot (V_T \cdot u) + \sin(\varphi) \cdot (V_T \cdot v)} \right] \quad (5-15)$$

Dengan menggunakan  $\lambda_c$  ke dalam Persamaan (5-10), maka koordinat *LE-point* dapat diperoleh.

### 5.3. Metode Analitis untuk Pengefraisan Semihalus

Umumnya terdapat tiga tahapan dalam proses pemesinan milling untuk menghasilkan pola dan cetakan, yaitu pengefraisan kasar (*rough milling*), pengefraisan semihalus (*semi-finish milling*), dan pengefraisan

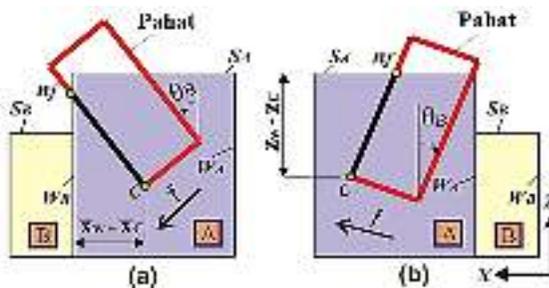
halus (*finish milling*). Karakteristik bentuk permukaan benda kerja dan orientasi pahat untuk setiap tahapan kemungkinan berbeda. Pada subbab ini akan diuraikan proses menentukan geometri tatal pada proses pengefraisan semihalus menggunakan metode analitis. Pengefraisan semihalus adalah proses pemesinan untuk menghilangkan sisa benda kerja hasil dari proses pengefraisan kasar dan meninggalkan tebal yang relatif seragam untuk proses halus. Karakteristik dari proses pemesinan semihalus pada pemesinan yang kompleks adalah variasi gaya potong yang ekstrem. Hal ini disebabkan karena geometri tatal yang dihasilkan sangat dinamis akibat bentuk permukaan benda kerja dan produk yang kompleks. Meskipun pengefraisan semihalus tidak terlalu memperhatikan kualitas permukaan hasil pemesinan, namun variasi gaya potong yang ekstrem dapat memberi dampak yang negatif bagi pahat potong. Oleh karena itu maka mengendalikan gaya potong yang dihasilkan dari proses pengefraisan semihalus menjadi sangat penting.

### 5.3.1. Menentukan UE-Point pada Pahat Datar

Metode analitis yang dikembangkan adalah untuk menentukan geometri tatal pada proses pemesinan *semi-finish*. Benda kerja pada proses *semi-finish* dihasilkan dari proses pemesinan kasar di mana biasanya permukaan benda kerja berbentuk seperti anak tangga (*stair shape workpiece*). Bentuk permukaan benda kerja direpresentasikan menggunakan vektor vertikal pada sumbu-z yang terletak pada setiap batas dari setiap anak tangga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-1b. Untuk menentukan bentuk benda kerja maka dua buah vektor diidentifikasi pada setiap posisi pahat, yaitu,  $v_A(x_A, y_A, z_A)$  dan  $v_B(x_B, y_B, z_B)$ . Vektor  $v_A$  terletak sebelum titik  $C(x_C, y_C, z_C)$  sementara vektor  $v_B$  bisa sebelum atau sesudah  $v_A$ . Hal ini tergantung dari orientasi pahat. Kedua vektor tersebut

diidentifikasi untuk menentukan dua buah blok benda kerja yang berpotensi bersinggungan dengan pahat, yaitu blok A dan blok B. Karena orientasi pahat yang kompleks pada pemesinan 5 sumbu, maka UE-point bisa berada pada bagian atas blok A ( $S_A$ ), dinding blok A ( $W_A$ ), bagian atas blok B ( $S_B$ ), atau dinding blok B ( $W_B$ ).

Perhitungan UE-point diawali dengan asumsi bahwa titik tersebut berada pada bagian atas blok A. UE-point yang dihasilkan pada tahap ini disebut sebagai UE-point awal (*initial UE-point*),  $n_i(x_{n_i}, y_{n_i}, z_{n_i})$ . Hasil perhitungan ini disebut "awal" karena masih perlu diperiksa apakah asumsi yang digunakan benar atau tidak. Jika benar maka nilai akhir UE-point  $n_f(x_{n_f}, y_{n_f}, z_{n_f})$  sama dengan  $n_i$ . Jika tidak, maka perhitungan dilanjutkan hingga koordinat UE-point yang sebenarnya diperoleh.



Gambar 5-5 Dua lokasi UE-point pada Pahat Datar, a) Dinding Benda Kerja, dan b) Bagian Atas Benda Kerja.

Koordinat UE-point dapat dihitung menggunakan Persamaan (5-9) setelah panjang tatal ( $l_n$ ) diperoleh. Untuk pahat datar dengan ( $l = l_n$ ), sebuah metode yang disebut dengan *Cylindrical boundary* digunakan untuk menentukan panjang tatal. Metode ini terdiri dari dua pendekatan yaitu *X-Cylindrical boundary* dan *Z-Cylindrical boundary*.

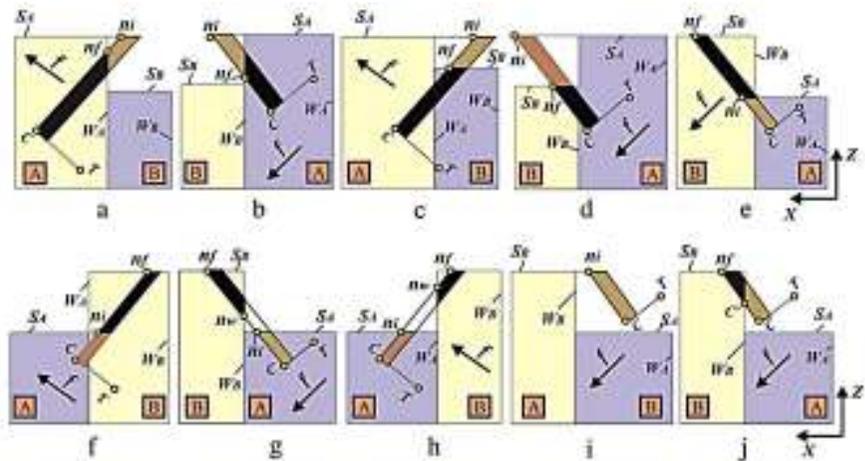
*X-Cylindrical boundary* digunakan ketika UE-point berada pada dinding blok benda kerja. Panjang tatal dihitung berdasarkan jarak antara titik *C* dan dinding pada sumbu-*x* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-5a, sebagai berikut,

$$l_n = (x_w - x_C) / \sin \theta_B \tag{5-16}$$

*Z-Cylindrical boundary* digunakan ketika UE-point berada pada bagian atas blok benda kerja. Panjang tatal dihitung berdasarkan jarak antara titik *C* dan permukaan bagian atas pada sumbu-*z* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-5b, sebagai berikut,

$$l_n = (z_w - z_C) / \cos \vartheta \tag{5-17}$$

Karena UE-point awal diasumsikan berada pada *S<sub>A</sub>*, maka panjang tatal dihitung menggunakan *Z-Cylindrical boundary* dengan *z<sub>w</sub>* = *z<sub>A</sub>*. Setelah itu maka *l<sub>n</sub>* digunakan untuk menentukan koordinat awal UE-point (*n<sub>i</sub>*).



Gambar 5-6 Lokasi UE-Point Ketika *z<sub>A</sub>* < *z<sub>B</sub>*

Setelah  $n_i$  dihitung, selanjutnya diperiksa apakah UE-point memang terletak di  $S_A$  atau tidak. Asumsi awal dianggap salah jika  $x_{n_i} < x_A$  ketika pahat memiliki sudut  $\theta_B$  negatif, atau jika  $x_{n_i} > x_B$  ketika pahat memiliki sudut  $\theta_B$  positif. Jika letak UE-point pada asumsi awal salah maka perlu dihitung kembali menggunakan asumsi kedua di mana UE-point terletak pada dinding blok,  $n_w(x_{n_w}, y_{n_w}, z_{n_w})$ .  $n_w$  dihitung menggunakan metode *X-Cylindrical boundary* setelah terlebih dahulu ditentukan jarak antara titik  $C$  dan dinding blok pada sumbu- $x$  ( $l_w$ ). Jarak  $l_w$  dihitung terhadap dinding blok A ketika sudut pahat  $\theta_B$  bernilai negatif, atau sebaliknya, terhadap dinding blok B ketika sudut  $\theta_B$  bernilai positif. Setelah koordinat titik  $n_w$  diperoleh, beberapa kesimpulan untuk menentukan UE-point final ( $n_f$ ) dapat ditentukan.

Tabel 5-1 Cara untuk Mengidentifikasi dan Menghitung UE-Point pada Pahat Datar

No.	Indikasi	Lokasi UE-Point	$l_n$
<b><math>z_A &gt; z_B</math></b>			
A.1	$x_{n_i} < x_A, z_{n_i} > z_B, z_{n_w} < z_B$	$W_A$ (Gambar 5-6a)	$l_n = l_B$
A.2	$x_{n_i} > x_B, z_{n_i} > z_B, z_{n_w} < z_B$	$W_B$ (Gambar 5-6b)	$l_n = l_B$
A.3	$x_{n_i} < x_A, z_{n_i} > z_B, z_{n_w} > z_B$	$S_B$ (Gambar 5-6c)	$l_n = l_W$
A.4	$x_{n_i} > x_B, z_{n_i} > z_B, z_{n_w} > z_B$	$S_B$ (Gambar 5-6d)	$l_n = l_W$
<b><math>z_A &lt; z_B</math></b>			
B.1	$x_{n_i} > x_B, z_{n_w} < z_A < z_B$ $z_C < z_A$	dan $S_B$ (Gambar 5-6e)	$l_n = l_B$
B.2	$x_{n_i} < x_A, z_{n_w} < z_A < z_B$ $z_C < z_A$	dan $S_B$ (Gambar 5-6f)	$l_n = l_B$
B.3	$x_{n_i} < x_B, z_A < z_{n_w} < z_B$ $z_C < z_A$	dan $W_B$ dan $S_B$ (Gambar 5-6g)	$l_n = l_B - (l_W - l_A)$
B.4	$x_{n_i} > x_B, z_{n_w} < z_A < z_B$ $z_C < z_A$	dan $W_A$ dan $S_B$ (Gambar 5-6h)	$l_n = l_B - (l_W - l_A)$
B.5	$z_C > z_A$ dan $z_w > z_B$	None (Gambar 5-6i)	$l_n = 0$
B.6	$z_C > z_A$ dan $z_w < z_B$	$S_B$ (Gambar 5-6j)	$l_n = (l_B - l_A)$

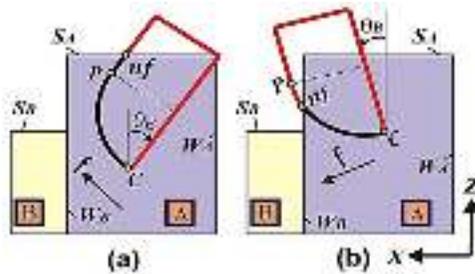
Semua kondisi persinggungan antara pahat dan benda kerja diilustrasikan pada Gambar 5-6. Metode yang digunakan untuk mengidentifikasi lokasi *UE-point* dan menghitung panjang tatal disajikan pada Tabel 5-1. Panjang tatal  $l_A$  dan  $l_B$  secara berurutan adalah panjang ketika *UE-point* berada pada  $S_A$  dan  $S_B$ . Keduanya dihitung menggunakan *Z-Cylindrical boundary*. Untuk kasus B.3 dan B.4, pahat bersinggungan dengan kedua blok benda kerja dan sebagian dari sisi potong (di antara *UE-point* dan *LE-point*) berada di luar benda kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-6g dan Gambar 5-6h. Kondisi lain diperlihatkan pada B6 di mana pahat berada di atas  $S_A$ , namun sebagian sisi potong pahat bersentuhan dengan blok B. Dalam kasus ini *LE-point* digeser dari  $C$  ke  $C'$ .

### 5.3.2. Menentukan *UE-Point* pada Pahat Toroidal

Karena persamaan parametris untuk permukaan silinder dan toroidal berbeda, maka metode yang digunakan untuk menghitung geometri tatal hasil pemotongan dengan pahat silinder dan toroidal juga berbeda. Oleh karena itu maka lokasi *UE-point* final ( $n_f$ ) pada pahat toroidal perlu ditentukan terlebih dahulu apakah terletak pada sisi silinder atau sisi toroidal pahat. Cara menentukannya adalah dengan memeriksa koordinat *UE-point* relatif  $C$  dan  $P(x_p, y_p, z_p)$ , di mana titik  $P$  adalah titik batas antara sisi toroidal dan silinder, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-7.

Agar pemeriksaan posisi *UE-point* dapat dilakukan dengan mudah maka *UE-point* ditransformasikan ke TCS. Jika *UE-point* berada di atas titik  $P$ , maka artinya *UE-point* berada pada permukaan silinder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-7a. Pada kondisi ini maka *UE-point* dihitung menggunakan *Cylindrical boundary* sebagaimana yang sudah diuraikan pada subbab sebelumnya. Hanya saja jarak persinggungan tidak dihitung dari

titik  $C$  ke  $n_f$ , namun dihitung dari titik  $P$  ke titik  $n_f$ . Di sisi lain, ketika UE-point berada di bawah titik  $P$ , maka artinya UE-point berada pada permukaan toroidal seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5-7b. Metode yang digunakan untuk menentukan UE-point pada sisi toroidal akan dibahas pada subbab ini.



Gambar 5-7 Dua Lokasi UE-Point pada Pahat Toroidal

Koordinat UE-point pada sisi toroidal dapat ditentukan setelah sudut toroidal ( $\lambda_n$ ) diperoleh.  $\lambda_n$  dihitung menggunakan metode yang disebut dengan *Toroidal Boundary*, yang terdiri dari *Z-Toroidal Boundary* dan *X-Toroidal Boundary*. Sudut toroidal dapat ditentukan jika setidaknya salah satu sumbu koordinat dari UE-point  $n_f(x_{nf}, y_{nf}, z_{nf})$  diketahui. Sebagai contoh, ketika UE-point berada pada dinding blok benda kerja seperti yang disajikan pada Gambar 5-7b, maka  $x_{nf}$  sama dengan  $x_B$ . Dalam kondisi ini,  $\lambda_n$  dapat dihitung menggunakan metode *X-Toroidal Boundary*. Sementara itu ketika UE-point berada pada bagian atas benda kerja maka  $z_{nf}$  sama dengan  $z_B$  dan  $\lambda_n$  dihitung menggunakan metode *Z-Toroidal Boundary*.

*Z-Toroidal Boundary* digunakan ketika UE-point berada pada permukaan benda kerja bagian atas. Dalam kasus ini  $z'_{S_T}$  pada Persamaan (5-10) sudah teridentifikasi di mana nilainya sama dengan

sumbu-z bagian atas blok benda kerja di mana UE-*point* berada. Karena tujuan dari perhitungan yang akan dilakukan adalah untuk menentukan koordinat UE-*point* maka  $z'_{S_T}$  diubah menjadi  $z_{n_f}$ . Sudut toroidal UE-*point* dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$z_{n_f} = [-\cos \theta_A \sin \theta_B \sin \theta_A \cos \theta_A \cos \theta_B z_T] S_T(\varphi; \lambda) \quad (5-18)$$

Dengan mensubstitusikan  $S_T(\varphi; \lambda)$  dari Persamaan (5-8) ke dalam Persamaan (5-18)

$$\begin{aligned} &[-r \cos \theta_A \cos \theta_B] \cos \lambda + \\ &[r \cos \varphi \sin \theta_A - r \sin \varphi \sin \theta_A \sin \theta_B] \sin \lambda = (z'_{G_T} - z_T) - \\ &[r \cos \theta_A \cos \theta_B + r_m \cos \varphi \sin \theta_A - r_m \sin \varphi \cos \theta_A \sin \theta_B] \end{aligned} \quad (5-19)$$

Persamaan (5-19) dapat disederhanakan sehingga menjadi,

$$a \cos \lambda + b \sin \lambda = c \quad (5-20)$$

di mana:

$$\begin{aligned} a &= -r \cos \theta_A \cos \theta_B; \\ b &= r \cos \varphi \sin \theta_A - r \sin \varphi \cos \theta_A \sin \theta_B \\ c &= (z'_{G_T} - z_T) - [r \cos \theta_A \cos \theta_B + r_m \cos \varphi \sin \theta_A - \\ &\quad r_m \sin \varphi \cos \theta_A \sin \theta_B] \end{aligned} \quad (5-21)$$

Untuk menyelesaikan persoalan di atas, fungsi trigonometri ganda diubah menjadi fungsi trigonometri tunggal sebagai berikut,

$$k \cos(\lambda - \tau) = (k \cos \tau) \cos \lambda + (k \sin \tau) \sin \lambda \quad (5-22)$$

Mengacu kepada Persamaan (5-20) dan Persamaan (5-22), maka  $k$  dan  $\tau$  dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$k = \sqrt{a^2 + b^2}; \tau = \tan^{-1}(b/a) \quad (5-23)$$

Akhirnya sudut toroidal UE-*point* pada permukaan toroidal ditentukan sebagai berikut,

$$\lambda = \tau + \cos^{-1}(c/k) \quad (5-24)$$

*X-Toroidal Boundary* digunakan ketika UE-*point* berada pada bagian dinding benda kerja. Untuk kasus ini,  $x'_{S_T}$  pada Persamaan (5-10) sudah teridentifikasi di mana nilainya sama dengan sumbu- $x$  dinding blok benda kerja tempat UE-*point* berada. Karena tujuan dari perhitungan yang akan dilakukan adalah untuk menentukan koordinat UE-*point*, maka  $x'_{S_T}$  diubah menjadi  $x_{n_f}$ . Sudut toroidal UE-*point* dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$x_{n_f} = [\cos \theta_B \ 0 \ \sin \theta_B \ x_T] S_T (\varphi; \lambda) \quad (5-25)$$

$$(-r \sin \theta_B) \cos \lambda + (r \sin \varphi \cos \theta_B) \sin \lambda = (x_T - x_{n_f}) + (r_m \sin \varphi \cos \theta_B - r \sin \theta_B) \quad (5-26)$$

di mana,

$$a = -r \sin \theta_B;$$

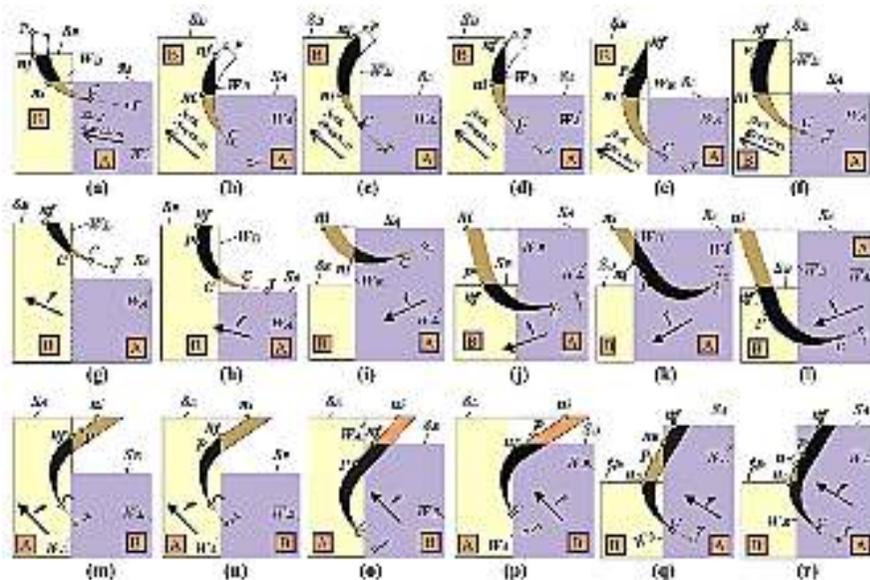
$$b = r \sin \varphi \cos \theta_B; \quad (5-27)$$

$$c = (x_T - x_{n_f}) + (r_m \sin \varphi \cos \theta_B - r \sin \theta_B)$$

Setelah itu sudut toroidal dihitung menggunakan fungsi trigonometri tunggal seperti yang dirumuskan pada Persamaan (5-22) - Persamaan (5-24).

Sama seperti pada pahat datar, UE-*point* dihitung menggunakan asumsi bahwa UE-*point* terletak pada bagian atas blok A ( $S_A$ ). Blok B ( $S_B$ ) pada pahat dengan sudut  $\theta_B$  positif terletak pada blok setelah blok A. Namun karena permukaan toroidal yang rumit maka mungkin saja terjadi persinggungan antara pahat dan blok yang terletak setelah blok A, meskipun pahat memiliki sudut  $\theta_B$  negatif. Oleh karena itu maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap  $\lambda_W$  menggunakan *X-Toroidal Boundary*. Nilai  $x_{n_f}$  yang

digunakan adalah nilai sumbu- $x$  vektor yang terletak setelah  $v_A$ . Jika  $0 < \lambda_W < 90$ , maka blok setelah blok A dipilih sebagai blok B, jika tidak maka blok B terletak sebelum blok A.



Gambar 5-8 Beberapa Kondisi Pemotongan yang Mungkin Terjadi Ketika Menggunakan Pahat Toroidal

Tabel 5-2 Cara untuk Mengidentifikasi dan Menghitung UE-Point pada Pahat Toroidal

No.	Indikasi	Lokasi UE-Point (Pahat dan Benda Kerja)	Metode	$\frac{z_{nf}/x_{nf}}{z_W/x_W}$
<b>A. (<math>x_{nf} &gt; x_B</math> dan <math>z_A &lt; z_B</math>)</b>				
1	$x_P > x_B$ dan $z_P > z_B$	Toroidal dan $S_B$ (Gambar 5-8a)	Z-toroidal	$z_{nf} = z_B$
2	$x_P < x_B$ dan $z_P < z_B$	Toroidal dan $W_B$ (Gambar 5-8b)	X-toroidal	$x_{nf} = x_B$
3	$x_P < x_B$ dan $z_P > z_B$	Toroidal dan $W_B$ (Gambar 5-8c)	X-toroidal Z-toroidal	$x_{nf} = x_B$

No.	Indikasi	Lokasi UE-Point (Pahat dan Benda Kerja)	Metode	$z_{nf}/x_{nf}$ / $z_W/x_W$
		Toroidal dan $W_B$ (Gambar 5-8d)		$z_{nf} = z_B$
4	$x_p > x_B$ ; $z_p < z_B$ dan $l_W < l_B$	Silinder dan $W_B$ (Gambar 5-8e)	X-Cylindrical	$x_W = x_B$
5	$x_p > x_B$ ; $z_p < z_B$ dan $l_W > l_B$	Silinder dan $S_B$ (Gambar 5-8f)	Z-Cylindrical	$z_W = z_B$
6	$z_c > z_A$ ; $z_c < z_B$ dan $z_p > z_B$	Toroidal dan $S_B$ (Gambar 5-8g) Toroidal dan $W_B$ (CC-point)	Z-toroidal X-toroidal	$z_{nf} = z_B$ $x_{nf}$ $= x_B$
7	$z_c > z_A$ ; $z_c < z_B$ dan $z_p > z_B$	Silinder dan $S_B$ (Gambar 5-8h) Silinder dan $W_B$ (CC-point)	Z- Cylindrical X-Cylindrical	$z_W = z_B$ $x_W = x_B$
<b>B. (<math>x_{ni} &gt; x_B</math> dan <math>z_A &gt; z_B</math>)</b>				
1	$x_p > x_B$ dan $z_p > z_B$	Toroidal dan $W_B$ (Gambar 5-8i) Toroidal dan $S_B$ (Gambar 5-8j)	X-toroidal Z-toroidal	$x_{nf}$ $= x_B$ $z_{nf} = z_B$
2	$x_p < x_B$ dan $z_p > z_B$	Silinder dan $W_B$ (Gambar 5-8k)	X-Cylindrical	$x_W = x_B$
3	$x_p < x_B$ dan $z_p < z_B$	Silinder dan $S_B$ (Gambar 5-8l)	Z-Cylindrical	$z_W = z_B$
<b>C. (<math>x_{ni} &lt; x_A</math> dan <math>z_A &gt; z_B</math>)</b>				
1	$x_p < x_A$ dan $z_p > z_B$	Toroidal dan $W_A$ (Gambar 5-8m) Toroidal dan $S_B$ (Gambar 5-8n)	X-toroidal Z-toroidal	$x_{nf}$ $= x_A$ $z_{nf} = z_B$
2	$x_p > x_B$ dan $z_p > z_B$	Silinder dan $W_B$ (Gambar 5-8o)	X-Cylindrical	$x_W = x_B$
3	$x_p > x_B$ dan $z_p < z_B$	Silinder dan $W_A$ (Gambar 5-8p) Silinder dan $S_B$	X-Cylindrical Z-Cylindrical	$x_W = x_A$ $z_W = z_B$
<b>D. (<math>0 &lt; \lambda_W &lt; 90</math> dan <math>z_A &gt; z_B</math>)</b>				
1	$z_c < z_B$ dan $x_p > x_B$	Silinder dan $S_B$ ( $n_B$ ) (Gambar 5-8q) Silinder dan $W_B$ ( $n_W$ )	Z-toroidal X-Cylindrical	$z_{nf} = z_B$ $x_W = x_B$
2	$z_c < z_B$ dan $x_p < x_B$	Silinder dan $S_B$ ( $n_B$ ) (Gambar 5-8r) Silinder dan $W_B$ ( $n_W$ )	Z-toroidal X-toroidal	$z_{nf} = z_B$ $x_{nf}$ $= x_B$

Berbagai kondisi yang mungkin terjadi dalam menentukan *UE-point* disajikan pada Gambar 5-8. Metode untuk mengidentifikasi lokasi *UE-point* dan *LE-point*, termasuk cara untuk menghitung koordinatnya disajikan pada Tabel 5-2. Sebagian besar dari kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode yang tepat dapat dipilih hanya dengan membandingkan koordinat dari beberapa variabel seperti  $v_A, v_B, n_i, P$ . Namun terdapat beberapa kasus seperti kasus A.3, B.1, C.1, dan C.3 dari Tabel 5-2 di mana terdapat dua cara yang mungkin dilakukan untuk menentukan sudut toroidal *UE-point*. Dari dua cara tersebut, hanya satu cara yang akan memberikan hasil yang tepat. Oleh karena itu maka kedua cara tersebut perlu dihitung untuk menentukan hasil yang benar.

Untuk kasus A.3, metode yang menghasilkan  $\lambda_{n_f}$  lebih kecil adalah metode yang benar dan hasilnya digunakan untuk menentukan *UE-point*. Sebaliknya, metode yang menghasilkan  $\lambda_{n_f}$  lebih besar dipilih untuk menghitung *UE-point* pada kasus B.1 dan C.1. Metode yang dipilih pada C.1 adalah metode yang menghasilkan  $l_n$  lebih kecil.

Kondisi lain ditemukan pada kasus A.6 dan A.7. Meskipun  $C$  terletak di atas  $S_A$ , tidak dapat disimpulkan bahwa tidak terjadi persinggungan antara pahat dan benda kerja. Pahat mungkin saja bersinggungan dengan blok B. Dalam kedua kasus tersebut maka *LE-point* berpindah dari titik  $C$  ke  $C'$ . Konsekuensinya adalah, koordinat  $C'$  perlu dihitung. Sudut toroidal untuk  $C'$  pada kasus A.6 diperoleh menggunakan metode *X-toroidal boundary* dengan  $x_{n_f} = x_B$ . Di sisi lain, karena *LE-point* terletak pada sisi silinder, maka *X-cylindrical boundary* dengan  $x_w = x_B$  digunakan untuk menghitung *LE-point* pada kasus A.7.

Meskipun asumsi awal di mana  $n_i$  terletak pada  $S_A$  adalah benar, namun mungkin saja terjadi di mana sebagian dari sisi

potong di antara *LE-point* dan *UE-point* berada di luar benda kerja. Kondisi ini terjadi ketika  $0 < \lambda_w < 90$  seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5-8q dan Gambar 5-8r. Dalam kasus ini maka terdapat dua titik lagi yang harus dihitung, *UE-point* pada permukaan  $S_B$  ( $n_B$ ) dan *UE-point* pada  $W_B$  ( $n_w$ ).

### 5.3.3. Menghitung Geometri Total

Setelah  $\lambda_{nf}$ ,  $\lambda_c$  dan  $l_n$  diperoleh, maka selanjutnya geometri total dihitung. Agar metode yang digunakan berlaku umum, maka persamaan yang sama digunakan untuk pahat datar dan pahat toroidal. Oleh karena itu maka  $r = 0$  ketika pahat yang digunakan adalah pahat datar. Nilai dalam pemakanan ( $d$ ) terhadap sudut rotasi ditentukan sebagai berikut,

$$d = (r(\cos \lambda_c - \cos \lambda_n) + l_n) \cos \alpha \quad (5-28)$$

Untuk pahat toroidal,  $l_n$  adalah panjang persinggungan antara sisi silinder pahat terhadap benda kerja. Oleh karena itu maka  $l_n = 0$  ketika *UE-point* terletak pada sisi toroidal. Di sisi lain, ketika *UE-point* terletak pada sisi silinder, maka  $\lambda_n = 90$ . Sehingga panjang total dihitung menggunakan rumus berikut,

$$q = \frac{\pi \cdot r}{180} (\lambda_n - \lambda_c) + l_n \quad (5-29)$$

Optimasi pemesinan dapat ditentukan menggunakan luas total (*cut area*) yang dihasilkan dari setiap proses pemotongan untuk setiap pergerakan pahat. Oleh karena itu maka untuk dapat menghitung luas total, tebal total (*cut thickness*) perlu dihitung terlebih dahulu. Tebal pemakanan dapat didefinisikan sebagai jarak antara dua lintasan pahat yang besarnya ditentukan oleh laju pemakanan. Namun definisi ini hanya berlaku ketika pemesinan dilakukan dengan posisi pahat tegak lurus terhadap arah laju

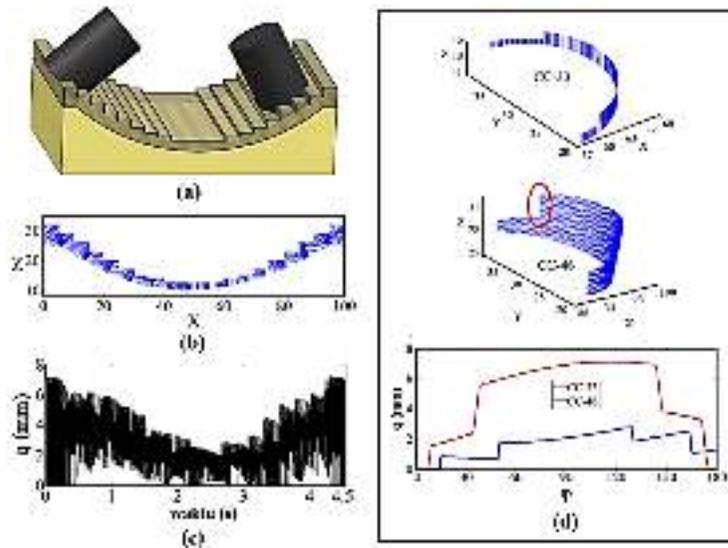
pemakanan. Ketika sudut inklinasi digunakan maka dampak dari sudut ini perlu dipertimbangkan. Sudut inklinasi cenderung menghasilkan tebal tatal yang lebih kecil dibanding jarak antara dua lintasan pahat. Oleh karena itu maka tebal pemakanan dihitung menggunakan rumus berikut,

$$h = f \cos \alpha \sin \varphi \tag{5-30}$$

Sehingga luas tatal merupakan perkalian antara tebal tatal dengan lebar tatal berikut ini,

$$A_\varphi = q \cdot h \tag{5-31}$$

### 5.3.4. Pengujian Metode Analitis pada Pengefraisan Semihalus



Gambar 5-9 a) Model Produk dan Benda Kerja Pengujian untuk Pahat Datar, b) Bentuk Tatal untuk Satu Lintasan Pahat, c) Panjang Tatal untuk Satu Lintasan Pahat, d) Bentuk dan Panjang Tatal untuk CC-33 dan CC-46 dengan  $\varphi \in \{0, 180\}$

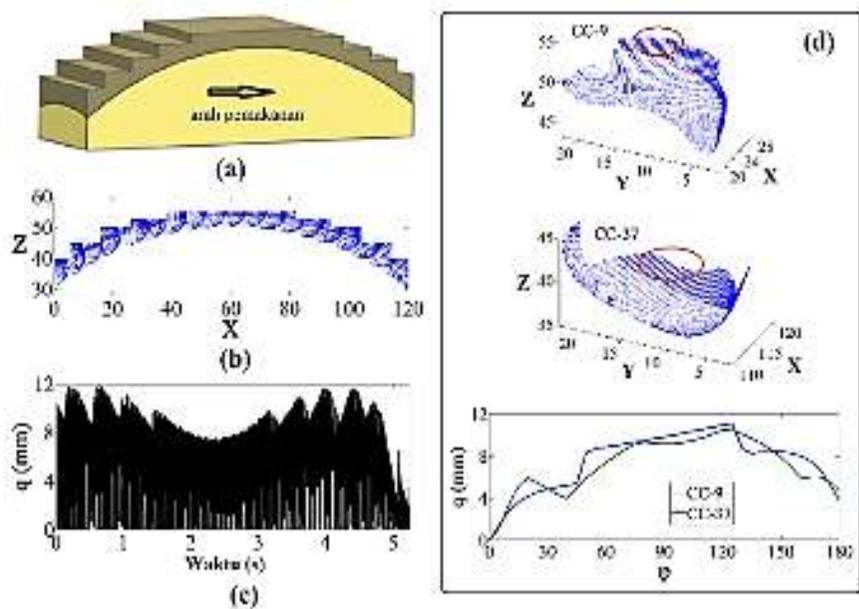
Seluruh algoritma yang dikembangkan pada subbab sebelumnya telah digunakan untuk membuat program simulasi menggunakan Matlab. Program simulasi ini diberi nama *Analytical Boundary Simulation* (ABS). Pada subbab ini akan dilakukan pengujian terhadap kemampuan ABS dalam menghitung geometri total pada proses pemesinan 5 sumbu menggunakan pahat datar dan pahat toroidal. Keunggulan metode analitis dalam hal waktu komputasi dibanding metode lainnya juga akan disajikan.

#### 5.3.4.1. Implementasi dengan Pahat Datar

Sebuah rancangan produk dan benda kerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-9a telah diuji. Dalam pengujian ini, orientasi pahat menggunakan sudut inklinasi  $10^\circ$  dan sudut *skrew*  $5^\circ$ . Kondisi pemesinan yang digunakan pada pengujian ini adalah laju pemakanan  $0.3 \text{ mm/gigi}$  dan kecepatan spindel  $5000 \text{ rpm}$ . Sebuah pahat datar dengan dua gigi dan diameter  $20 \text{ mm}$  digunakan sebagai pisau potong. Bentuk dan ukuran total dapat dihasilkan dengan menggunakan metode ABS. Bentuk total yang dihasilkan dari program simulasi disajikan pada Gambar 5-9b. Bentuk total pada bagian atas mirip dengan bentuk permukaan benda kerja, sedangkan pada bagian bawah serupa dengan bentuk dari permukaan produk yang dirancang. Hasil ini mengindikasikan bahwa metode ABS mampu menghitung geometri total dengan akurat. Panjang total untuk setiap pergerakan pahat (setiap  $3,33 \times 10^{-5}$  detik) dalam satu lintasan pahat disajikan pada Gambar 5-9c. Orientasi pahat dan bentuk benda kerja selalu berubah yang menyebabkan panjang total selalu berfluktuasi secara signifikan selama proses pemesinan.

Bentuk dan panjang total terhadap sudut rotasi untuk CC-33 dan CC-46 disajikan pada Gambar 5-9d. Karena benda kerja memiliki permukaan berbentuk tangga (*staircase*) yang rapat, menyebabkan

pahat dapat bersinggungan dengan lebih dari dua blok benda kerja seperti yang ditunjukkan pada CC-33. Sementara untuk CC-46, pahat bersinggungan dengan hanya dua blok benda kerja. Tatal seperti yang disorot pada CC-46 menunjukkan kondisi ketika pahat bersinggungan dengan dua blok benda kerja, namun sebagian sisi pahat yang berada di antara UE-point dan LE-point tidak bersinggungan dengan benda kerja. Kondisi ini sama seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5-6g dan Gambar 5-6h. Kehadiran sudut *skrew* membuat bentuk grafik pada Gambar 5-6d menjadi tidak simetri.



Gambar 5-10 a) Model Produk dan Benda Kerja Pengujian untuk Pahat Toroidal, b) Bentuk Tatal untuk Satu Lintasan Pahat, c) Panjang Tatal untuk Satu Lintasan Pahat, d) Bentuk dan Panjang Tatal untuk CC-9 dan CC-37 dengan  $\varphi \in \{0, 180\}$

### 5.3.4.2. Implementasi dengan Pahat Toroidal

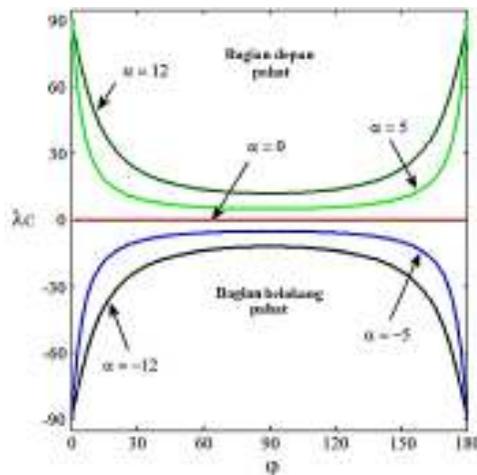
Metode yang dikembangkan untuk pahat telah diimplementasi dan diuji. Sebuah produk dengan desain yang kompleks seperti ditunjukkan pada Gambar 5-10a digunakan sebagai model untuk pengujian. Sebuah pahat toroidal dua gigi berdiameter 20 mm dan radius minor 5 mm digunakan sebagai pahat potong. Orientasi pahat menggunakan sudut inklinasi  $10^\circ$  relatif terhadap permukaan normal (*surface normal*). Sama dengan pahat datar, bentuk tatal yang dihasilkan menggunakan ABS mirip dengan bentuk benda kerja dan permukaan produk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-10b. Hal ini juga mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan akurat. Panjang tatal yang dihasilkan untuk setiap putaran pahat (setiap  $3,33 \times 10^{-5}$  detik) disajikan pada Gambar 5-10c.

Bentuk dan panjang tatal untuk setiap sudut rotasi pahat pada CC-9 dan CC-37 ditampilkan pada Gambar 5-10d. Bentuk tatal lurus dan dengan garis tebal pada bagian atas yang ditandai dengan lingkaran warna merah mengindikasikan bahwa UE-*point* berada pada permukaan silinder pahat. Dalam kondisi ini maka persinggungan antara pahat dan benda kerja terjadi sisi toroidal dan silinder pahat. Jika tidak ada garis tersebut pada bagian atas tatal, maka hal ini berarti bahwa persinggungan hanya terjadi pada sisi toroidal pahat. Pada Gambar 5-10d juga dapat dilihat bentuk LE-*point* untuk setiap sudut rotasi. Karena orientasi pahat diatur menggunakan sudut inklinasi, hal ini menyebabkan bentuk tatal pada bagian bawah terlihat tidak mirip dengan bentuk bagian bawah pahat. Ketika sudut inklinasi digunakan maka lokasi LE-*point* menjadi sangat dinamis.

Sebuah pengujian juga dilakukan yang bertujuan untuk melihat dampak dari sudut inklinasi terhadap sudut toroidal yang pada akhirnya berdampak juga terhadap lokasi LE-*point* pada

pahat. Lokasi *LE-point* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-11 direpresentasikan dengan sudut toroidal. Ketika pahat tidak memiliki sudut inklinasi, maka *LE-point* untuk setiap sudut rotasi terletak pada bagian dasar pahat sebelah depan ( $\lambda_c = 0$ ). Namun ketika sudut inklinasi positif digunakan, maka *LE-point* berada pada bagian depan *cutting edge* dengan  $\lambda_c > 0$ . Dari Gambar 5-11 dapat dilihat bahwa semakin besar sudut inklinasi maka semakin meningkat  $\lambda_c$ . Sudut inklinasi positif akan menghasilkan  $\lambda_c$  yang lebih besar namun panjang tatal semakin kecil.

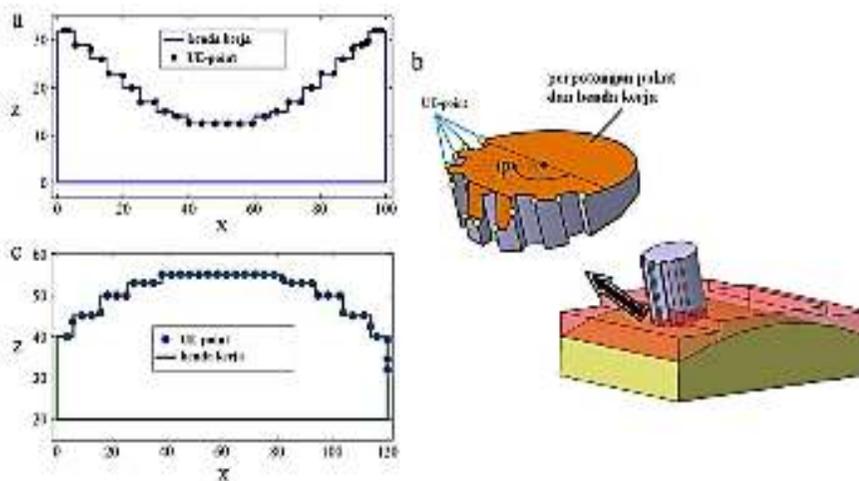
Hampir sama dengan sudut inklinasi positif, meningkatnya sudut inklinasi negatif juga akan meningkatkan  $\lambda_c$ . Tanda minus pada grafik menunjukkan bahwa *LE-point* berada pada bagian belakang pahat. Namun meningkatnya  $\lambda_c$  cenderung akan menghasilkan panjang tatal yang lebih besar karena persinggungan tidak hanya terjadi pada sisi potong bagian depan, namun juga pada sisi potong pada bagian belakang.



Gambar 5-11 Efek Sudut Inklinasi Terhadap Sudut Toroidal *LE-Point*

### 5.3.4.3. Verifikasi Model

Meskipun profil geometri tatal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-9 dan Gambar 5-10 mirip dengan bentuk permukaan produk yang dihasilkan dan bentuk benda kerja, namun akurasi metode yang dikembangkan tetap perlu diverifikasi. Gambar 5-12 menampilkan dua metode verifikasi yang dilakukan. Metode yang pertama mengukur akurasi dengan cara membandingkan koordinat *UE-point* terhadap permukaan benda kerja. Pengujian pertama dilakukan pada model pengujian untuk pahat datar seperti yang terlihat pada Gambar 5-9a. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua *UE-point* untuk setiap *CC-point* pada  $\varphi = 100$  secara presisi berhimpit dengan garis permukaan benda kerja seperti yang disajikan pada Gambar 5-12a. Hal ini membuktikan bahwa metode yang dikembangkan akurat.



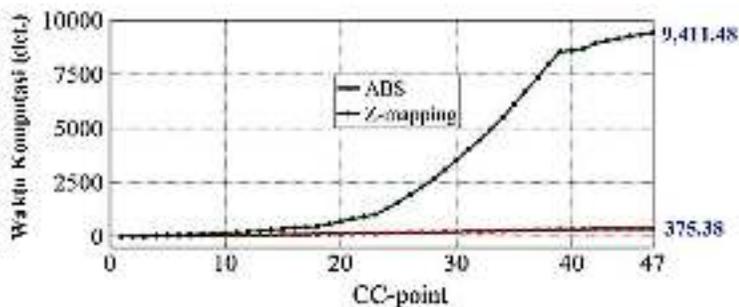
Gambar 5-12 Verifikasi Model, a) Model Tes 1, b) Verifikasi Menggunakan Siemens-NX, c) Model Tes 2

Untuk memastikan bahwa *UE-point* yang dihasilkan dari program ABS merupakan hasil perpotongan antara pahat dan benda kerja, maka metode verifikasi lainnya dilakukan. Verifikasi dilakukan menggunakan *software* Siemens-NX. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5-9b, koordinat *UE-point* ( $n_f$ ) diperiksa melalui model yang diekstraksi dari persinggungan pahat potong dan benda kerja. Model ekstraksi diperoleh dengan cara menempatkan model pahat pada *CC-point* dan selanjutnya orientasi pahat diatur. Setelah pahat berada pada benda kerja, maka persinggungan pahat dan benda kerja bisa diekstraksi. Model pahat potong sengaja dibuat beralur pada bagian depannya agar mudah untuk menentukan sudut rotasi pahat. Setelah model ekstraksi diperoleh, maka koordinat *UE-point* dapat diperiksa dan dibandingkan dengan koordinat yang dihasilkan melalui program ABS. Semua *UE-point* yang disajikan pada Gambar 5-12a diverifikasi dan hasilnya mengkonfirmasi bahwa model yang dikembangkan akurat.

Sama seperti pahat datar, verifikasi juga dilakukan pada pahat toroidal. *UE-point* yang dihasilkan oleh program ABS dibandingkan bentuk permukaan benda kerja. Pada pengujian ini, *UE-point* pada sudut rotasi  $\varphi = 90$  untuk setiap *CC-point* diverifikasi dan hasilnya disajikan pada Gambar 5-12c. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa *UE-point* terletak tepat pada permukaan benda kerja. Untuk membuktikan akurasi dari metode yang dikembangkan, verifikasi kedua juga dilakukan menggunakan Siemens-NX. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat nilai yang sama antara koordinat yang dihitung menggunakan program ABS dan diukur menggunakan Siemens-NX.

#### 5.3.4.4. Pengujian Waktu Komputasi

Tujuan utama dari pengembangan metode analitis dalam menentukan geometri tatal adalah untuk mengatasi masalah terkait waktu komputasi yang biasanya muncul ketika menggunakan model solid dan metode diskrit. Oleh karena itu maka untuk meyakinkan bahwa metode yang dikembangkan lebih efisien dibanding metode lainnya, maka waktu komputasi diuji dan dibandingkan. Pengujian waktu komputasi ABS dilakukan dan dibandingkan dengan metode *Z-mapping*. Metode *Z-mapping* merupakan salah satu metode diskrit yang menggunakan vektor vertikal. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, akurasi dan waktu komputasi metode diskrit sangat dipengaruhi oleh jarak antara vektor atau disebut *grid size*. Di sisi lain, metode analitis tidak perlu menentukan *grid size* karena tidak ada korelasinya dengan waktu komputasi.



Gambar 5-13 Perbandingan Waktu Komputasi antara ABS dan *Z-Mapping*

Sebagai bahan perbandingan maka model pengujian pada Gambar 5-10a digunakan untuk mencari geometri tatal menggunakan metode *Z-mapping*. Untuk pengujian ini maka benda

kerja didiskritisasi dengan jarak antara vektor sebesar 0,1 mm. Selanjutnya waktu komputasi menggunakan metode ABS dan *Z-mapping* dihitung menggunakan program Matlab pada laptop intel Core i5 1.7GHz dengan 6 GB RAM. Tes dilakukan untuk satu lintasan pahat dari CC-1 hingga CC-47. Pengujian dilakukan tiga kali untuk masing-masing metode dan hasil rata-rata disajikan pada Gambar 5-13.

Dari grafik pada Gambar 5-13 dapat dilihat dengan jelas bahwa waktu komputasi yang dilakukan program ABS sangat singkat dibanding metode *Z-mapping*. ABS menghabiskan waktu 375,38 detik untuk menghitung geometri tatal, sementara *Z-mapping* membutuhkan waktu 9.411,48 detik. *Z-mapping* membutuhkan waktu yang lebih panjang karena harus selalu melakukan pengecekan vektor diskrit dan memperbaharui data yang jumlahnya sangat besar.

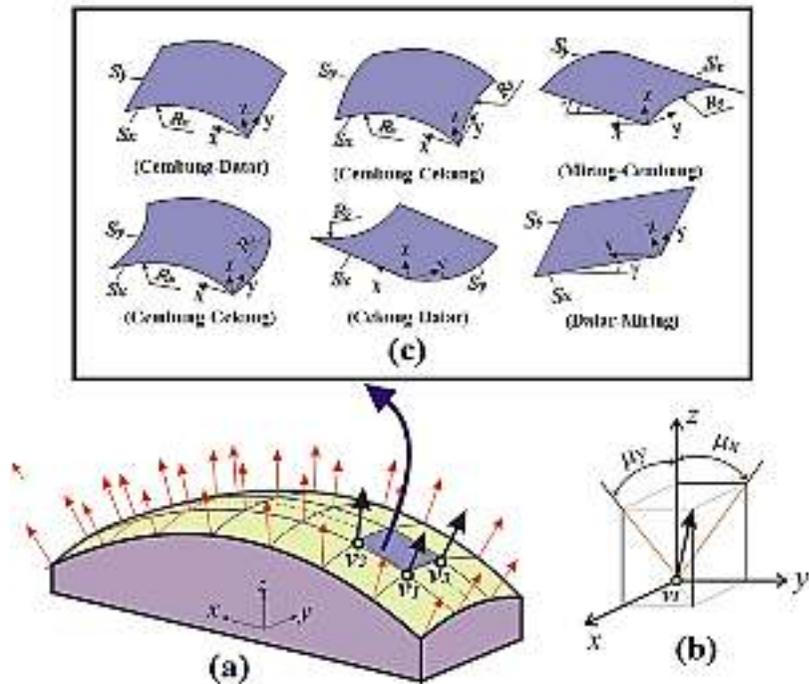
# **BAB 6.**

## **METODE ANALITIS UNTUK MENGHITUNG GEOMETRI TATAL PADA PEMESINAN HALUS 5-SUMBU**

Proses lanjutan dari pengefraisan semihalus adalah pengefraisan halus (*finish milling*). Luaran dari pengefraisan semihalus akan menghasilkan benda kerja dengan tebal sisa yang seragam. Ketika permukaan produk yang dihasilkan berbentuk kompleks, maka permukaan hasil dari pengefraisan semihalus juga memiliki kontur yang sama. Menentukan kondisi pemotongan pada proses pengefraisan halus sangat menantang dan rumit. Pengendalian akurasi dimensi benda kerja menjadi sangat penting dalam tahap ini. Untuk mendapatkan hasil yang akurat maka ketebalan pemakanan dan laju pemakanan yang rendah dipilih dalam proses halus. Rumitnya proses pada tahap ini menyebabkan waktu yang dihabiskan untuk proses pengefraisan halus merupakan yang terbesar dibanding pada tahap lainnya.

Metode yang ditawarkan untuk menghitung geometri tatal pada pengefraisan halus merupakan metode hibrid. Metode hibrid yang dimaksud adalah metode yang menggabungkan antara metode diskrit dan metode analitis. Pada metode ini, bentuk permukaan benda kerja diwakili menggunakan koordinat titik yang

tersebar seperti yang terlihat pada Gambar 6-1a. Namun tidak terdapat perhitungan untuk menentukan persinggungan antara vektor normal dan pahat potong meskipun bentuk permukaan benda kerja ditentukan menggunakan vektor normal. Jadi berbeda dengan metode diskrit sebagaimana yang diuraikan pada Bab 4, di mana persinggungan antara benda kerja dan pahat ditentukan dari persinggungan pahat dan vektor. Pada metode ini, vektor normal hanya digunakan sebagai acuan dalam menentukan bentuk permukaan benda kerja pada setiap *CC-point* secara matematika.



Gambar 6-1 Representasi Bentuk Permukaan Benda Kerja, a) Distribusi Vektor Normal, b) Orientasi Vektor pada WCS, c) Kemungkinan Bentuk Kombinasi Benda Kerja

Jika dibandingkan dengan metode diskrit secara penuh, maka metode hibrid ini menggunakan jumlah vektor yang jauh lebih sedikit dalam merepresentasikan bentuk permukaan benda kerja. Vektor normal merupakan sebuah titik pada permukaan benda kerja yang memiliki orientasi relatif terhadap WCS pada sumbu-x ( $\mu_x$ ) dan sumbu-y ( $\mu_y$ ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-1b.

Bentuk benda kerja pada setiap *CC-point* akan disederhanakan menggunakan kombinasi bentuk permukaan pada sumbu-x dan sumbu-y seperti yang disajikan pada Gambar 6-1c. Bentuk permukaan benda kerja dapat merupakan kombinasi dari bentuk cembung, cekung, datar atau miring. Metode untuk menentukan bentuk permukaan benda kerja dan menghitung geometri tatal pada pengefraisan halus disajikan pada subbab berikut ini.

### 6.1. Menentukan Bentuk Permukaan Benda Kerja

Untuk menghitung geometri tatal, bentuk permukaan benda kerja perlu diidentifikasi pada setiap posisi pahat. Gambar 6-2a menunjukkan tampak atas dari permukaan benda kerja. Bentuk dari area permukaan benda kerja yang berada di sekitar pahat potong didefinisikan menggunakan tiga buah vektor normal,  $v_1, v_2, v_3$ . Vektor  $v_1$  digunakan sebagai vektor acuan yang letaknya paling dekat dengan *CC-point*. Lokasi  $v_1$  dapat berada di area yang bersinggungan dengan pahat maupun di luar pahat.

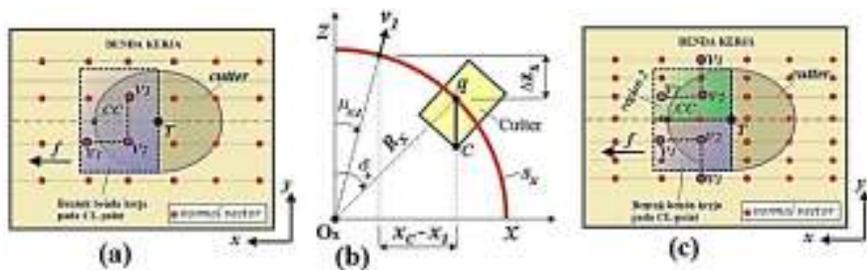
Berdasarkan koordinat dan orientasi dari permukaan normal, radius permukaan benda kerja pada sumbu-x ( $R_x$ ) ditentukan menggunakan Persamaan (6-1). Persamaan ini diturunkan dengan mengacu pada Gambar 6-2b. Dengan cara yang sama, radius permukaan benda kerja pada sumbu-y ( $R_y$ ) dapat dicari menggunakan Persamaan (6-2).

$$R_x = \left( \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \right) / (2 \sin(0.5(\mu_{x2} - \mu_{x1}))) \quad (6-1)$$

$$R_y = \left( \sqrt{(y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2} \right) / (2 \sin(0.5(\mu_{y2} - \mu_{y1}))) \quad (6-2)$$

Setelah  $(R_x)$  dan  $(R_y)$  diperoleh, selanjutnya beberapa kesimpulan terkait bentuk dari permukaan benda kerja pada sumbu-x ( $S_x$ ) dan sumbu-y ( $S_y$ ) dapat diambil. Beberapa kesimpulan terkait bentuk permukaan benda kerja dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Cembung : jika  $R_x > 0, R_y > 0$
2. Cekung : jika  $R_x < 0, R_y < 0$
3. Datar : jika  $R_x = 0$  dan  $\mu_{x1} = 0$ ; atau  $R_y = 0$  dan  $\mu_{y1} = 0$
4. Lereng : jika  $R_x = 0$  dan  $\mu_{x1} \neq 0$ , sudut lereng ( $\gamma$ ) =  $\mu_{x1}$ ; atau  $R_x = 0$  dan  $\mu_{y1} \neq 0$ ,  $\gamma = \mu_{y1}$



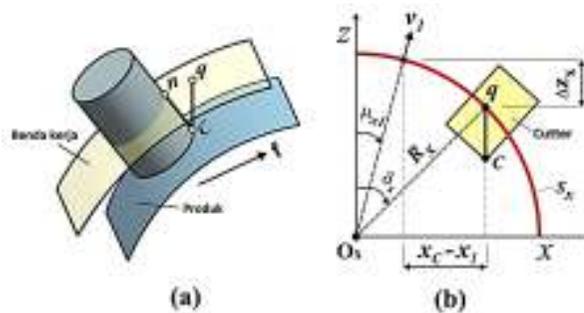
Gambar 6-2 Representasi Bentuk Benda Kerja, a) Tampak Atas Benda Kerja, b) Metode untuk Menghitung Radius

Dengan demikian maka bentuk permukaan benda kerja dibangun menggunakan kombinasi dari bentuk  $S_x$  dan  $S_y$ . Beberapa kemungkinan bentuk permukaan diilustrasikan pada Gambar 6-1c.

Menggunakan hanya satu area untuk mewakili permukaan bentuk benda pada suatu *CC-point* dapat diterapkan ketika bentuk permukaan benda kerja tidak terlalu kompleks, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6-1a. Namun ketika permukaan benda kerja sangat kompleks, maka menggunakan satu area saja untuk mewakili seluruh area pada satu *CC-point* akan cenderung menghasilkan kesalahan yang besar. Untuk bentuk permukaan yang kompleks, maka dalam satu posisi pahat bisa ditentukan lebih dari satu area. Untuk kasus seperti ini maka permukaan benda kerja perlu didiskritisasi menggunakan lebih banyak vektor normal. Untuk permukaan yang sederhana seperti bentuk setengah bola, setengah silinder atau bentuk datar, maka permukaan benda kerja dapat diwakili oleh satu kali penentuan area permukaan benda kerja. Akurasi pada metode ini sangat dipengaruhi oleh keakuratan dalam memprediksi bentuk permukaan benda kerja.

## **6.2. Menentukan UE-Point pada Pemesinan Permukaan Kompleks dengan Pahat Datar**

Li dan Jerard [19] menyimpulkan bahwa perubahan dari tiga sumbu ke lima sumbu akan meningkatkan efisiensi antara 10-20 kali. Pada mesin tiga sumbu biasanya menggunakan pahat bola untuk pemesinan dengan permukaan kompleks. Namun penggunaan pahat bola mengurangi efisiensi proses pemesinan karena bidang kontak antara pahat dan benda kerja sangat kecil sehingga proses pemesinan menjadi lama. Oleh karena itu maka penggunaan pahat datar pada pemesinan lima sumbu terus meningkat.



Gambar 6-3 Garis Proyeksi dan Lokasi UE-point

### 6.2.1. Menentukan Lokasi Persinggungan pada Pahat

Sebelum membahas lebih jauh, maka di setiap posisi pahat perlu ditentukan terlebih dahulu apakah terjadi persinggungan antara pahat dengan benda kerja, atau tidak. Cara menentukannya adalah dengan menghitung garis proyeksi  $q(x_q, y_q, z_q)$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-3. Karena garis proyeksi diperoleh dengan memproyeksikan titik  $C(x_c, y_c, z_c)$  pada sumbu-z, maka nilai  $\{x_q, y_q\}$  sama dengan  $\{x_c, y_c\}$ . Sementara  $z_q$  diperoleh dengan cara menghitung jarak pada sumbu-z antara  $v_1$  dan  $q$  pada permukaan  $S_x$  ( $\Delta Z_x$ ), dan sumbu-z pada  $S_y$  terhadap  $y_c$  ( $\Delta Z_y$ ). Pertama kali dicari nilai untuk beberapa variabel dari sudut pandang  $S_x$ . Nilai sumbu z dapat dihitung dengan cara membandingkan nilai  $x_c$  terhadap koordinat dan orientasi vektor  $v_1$ . Persamaan untuk menghitung  $\Delta Z_x$  dan  $\Delta Z_y$  pada permukaan cembung dan cekung dapat dilakukan menggunakan rumus berikut,

$$\delta_x = \sin^{-1}((R_x \sin \mu_{x1} + (x_c - x_1))/R_x); \quad (6-3)$$

$$\delta_y = \sin^{-1}((R_y \sin \mu_{y1} + (y_c - y_1))/R_y) \quad (6-4)$$

$$\Delta Z_x = R_x (\cos \delta_x - \cos \mu_{x1}) \quad (6-5)$$

$$\Delta Z_y = R_y (\cos \delta_y - \cos \mu_{y1}) \quad (6-6)$$

$\delta_x$  adalah sudut yang dibentuk antara garis  $\overline{O_x q}$  dan sumbu-z seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-3b. Sementara  $\delta_y$  adalah sudut yang dibentuk oleh garis  $\overline{O_y q}$  dengan sumbu-z. Untuk permukaan lereng,  $\Delta Z_x$  dan  $\Delta Z_y$  dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\Delta Z_x = (x_c - x_1) \tan \mu_{x1}; \quad (6-7)$$

$$\Delta Z_y = (y_c - y_1) \tan \mu_{y1}$$

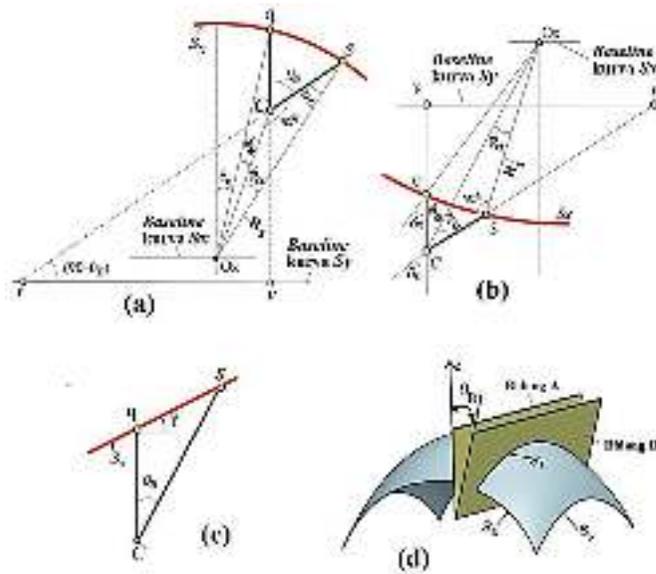
Sementara itu,  $\Delta Z_x$  dan  $\Delta Z_y$  untuk permukaan datar adalah sama dengan nol. Akhirnya  $z_q$  dapat hitung menggunakan rumus berikut,

$$z_q = z_1 + \Delta Z_x + \Delta Z_y \quad (6-8)$$

Setelah  $z_q$  diperoleh, selanjutnya panjang garis proyeksi dari titik  $C$  ke titik  $q$  dihitung menggunakan rumus  $\overline{Cq} = z_q - z_c$ . Garis proyeksi  $\overline{Cq}$  akan digunakan sebagai garis referensi awal dalam mencari UE-point. Persinggungan terjadi jika  $\overline{Cq}$  bernilai positif. Jika bernilai negatif, maka artinya sisi potong berada di atas permukaan benda kerja dan tidak ada persinggungan antara pahat dan benda kerja.

### 6.2.2. Menentukan UE-Point

Setelah garis proyeksi diperoleh, selanjutnya garis tersebut diputar sebesar sudut orientasi pahat ( $\theta_B$  dan  $\theta_A$ ) untuk memperoleh UE-point. Dua kali putaran dilakukan secara berurutan, kecuali untuk kondisi tertentu prosedur ini dapat dilalui dan lompat ke prosedur berikutnya. Pada bagian ini akan dijelaskan prosedur secara rinci untuk memperoleh UE-point ( $n_f$ ).



Gambar 6-4 Rotasi Garis Proyeksi pada  $S_x$ , a) Permukaan Cembung, b) Permukaan Cekung, c) Permukaan Lereng, dan d) Permukaan Miring

**6.2.2.1. Tahap 1: Putar Garis Proyeksi Sebesar  $\theta_B$**

Langkah pertama adalah memperoleh garis  $\overline{Cs}$ . Garis ini merupakan garis proyeksi yang diputar sebesar  $\theta_B$  dengan sumbu rotasi pada titik  $C$ . Jika  $\theta_B$  bernilai nol, maka garis  $\overline{Cs}$  sama dengan garis  $\overline{Cq}$ . Persamaan yang digunakan untuk menentukan garis yang diputar pada setiap bentuk permukaan benda kerja dijelaskan di bawah ini. Dengan menggunakan persamaan trigonometri, panjang garis dan sudut untuk permukaan cembung dapat ditentukan dengan mengacu pada Gambar 6-4a.

$$\overline{CO_x} = (\overline{Cq}^2 + R_x^2 - 2 \overline{Cq} R_x \cos \delta_x)^{0.5} \tag{6-9}$$

$$\phi_a = \cos^{-1}[(\overline{CO_x}^2 + R_x^2 - \overline{Cq}^2) / (2 \overline{CO_x} R_x)] \tag{6-10}$$

$$\phi_b = 180 - |\theta_B| - |\delta_x + \phi_a| \quad (6-11)$$

$$\phi_c = \sin(\overline{C O_x} \sin \phi_b / R_x) \quad (6-12)$$

$$\phi_c = \sin\left(\frac{\overline{C O_x} \sin \phi_b}{R_x}\right) \quad (6-13)$$

$$\phi_d = 180 - (\phi_b + \phi_c) \quad (6-14)$$

$$\overline{C s} = (R_x^2 + \overline{C O_x}^2 - 2 R_x^2 \overline{C O_x}^2 \cos \phi_d)^{0.5} \quad (6-15)$$

Sementara itu pada permukaan cekung, persamaan untuk menghitung garis  $\overline{C s}$  dibangun dengan mengacu kepada Gambar 6-4b. Adapun persamaan tersebut diuraikan sebagai berikut,

$$\overline{C O_x} = (\overline{C q}^2 + R_x^2 - 2 \overline{C q} R_x \cos \delta_x)^{0.5} \quad (6-16)$$

$$\phi_a = \sin^{-1}(R_x^2 \sin(180 - \delta_x) / \overline{C O_x}) \quad (6-17)$$

$$\phi_b = |\theta_B - \phi_a| \quad (6-18)$$

$$\phi_c = 180 - \sin^{-1}(\overline{C O_x} \sin \phi_b / R_x) \quad (6-19)$$

$$\phi_d = 180 - (\phi_b + \phi_c) \quad (6-20)$$

$$\overline{C s} = \overline{C O_x} \sin(\phi_d) / \sin \phi_c \quad (6-21)$$

Persamaan yang lebih sederhana digunakan untuk menghitung garis  $\overline{C s}$  pada permukaan lereng dan permukaan datar seperti yang disajikan pada Persamaan (6-22) dan Persamaan (6-23). Untuk permukaan lereng, persamaannya diturunkan dengan mengacu kepada Gambar 6-4c.

$$\overline{C s} = \overline{C q} \sin(90 + \gamma) / \sin(90 - \gamma - \theta_B) \quad (6-22)$$

$$\overline{C s} = \overline{C q} / \cos \theta_B \quad (6-23)$$

### 6.2.2.2. Tahap 2: Permukaan Miring

Pada tahap ini, jika  $\theta_B$  tidak bernilai nol maka hal ini berarti garis proyeksi telah dirotasi pada Tahap 1. Hasil dari rotasi Tahap 1

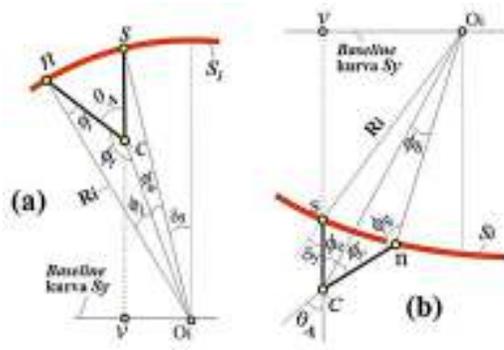
menyebabkan garis proyeksi tidak tegak lurus terhadap permukaan kedua ( $S_y$ ). Konsekuensinya ketika  $S_y$  berbentuk kurva, garis  $\overline{Cs}$  tidak dapat dirotasi pada permukaan  $S_y$  karena garis  $\overline{Cs}$  dan permukaan  $S_y$  tidak sejajar lagi. Hal ini dapat dianalogikan menggunakan Gambar 6-4d. Permukaan kurva miring ( $S_i$ ) diperoleh dengan cara mengiris benda kerja menggunakan bidang B. Bidang B pada dasarnya adalah bidang A yang dirotasi menggunakan  $\theta_B$ . Radius bidang  $S_i$  ( $R_i$ ) adalah tergan tung pada  $S_x$ . Ketika  $S_x$  adalah permukaan kurva, persamaan yang diturunkan mengacu pada Gambar 6-4a. Garis  $\overline{qv}$  merupakan jarak proyeksi pada sumbu-z yang diukur dari titik  $q$  pada permukaan benda kerja ke *baseline* dari permukaan kurva  $S_y$ .

$$\overline{qv} = R_y \cos \delta_y \quad (6-24)$$

$$\overline{st} = ((\overline{qv} - \overline{Cq}) / \cos \theta_x) + \overline{Cs} \text{ (permukaan cembung)} \quad (6-25)$$

$$\overline{st} = ((\overline{qv} + \overline{Cq}) / \cos \theta_x) - \overline{Cs}; \text{ (permukaan cekung)} \quad (6-26)$$

$$R_i = \left( (\overline{st})^2 + (R_y \sin \delta_y)^2 \right)^{0.5} \quad (6-27)$$



Gambar 6-5 Rotasi Garis Proyeksi Terputar pada  $S_i$ , a) Permukaan Cembung, b) Permukaan Cekung

Untuk kondisi di mana  $S_x$  berbentuk permukaan lereng dan datar maka radiusnya dihitung menggunakan rumus berikut,

$$R_i = (R_y \sin(90+\gamma))/\sin(90-\gamma - \theta_B); \text{ (permukaan lereng)} \quad (6-28)$$

$$R_i = R_y/\cos \theta_B; \text{ (permukaan datar)} \quad (6-29)$$

$R_i$  hanya dihitung ketika tiga kondisi terpenuhi, yaitu:  $\theta_B$ ,  $R_y$ , dan  $\theta_A$  tidak sama dengan nol. Jika tidak maka  $R_i = R_y$ .

### 6.2.2.3. Tahap 3: Rotasi Garis Terputar dengan $\theta_A$

Pada Tahap 3, garis proyeksi yang sudah diputar ( $\overline{C s}$ ) dari Tahap 1 akan kembali diputar pada titik  $C$  dengan sudut  $\theta_A$ . Rotasi ini dimaksudkan untuk memperoleh  $\overline{C n}$  pada permukaan  $S_i$ . Garis  $\overline{C n}$  mewakili panjang kontak antara pahat dan benda kerja, atau yang biasanya disebut panjang tatal. Langkah ini dilakukan hanya ketika  $\theta_A$  tidak sama dengan nol, jika tidak maka  $\overline{C n} = \overline{C s}$ . Untuk permukaan cembung, persamaan untuk menghitung  $\overline{C n}$  diperoleh dengan mengacu pada Gambar 6-5a.

$$\overline{C O}_i = (\overline{C s}^2 + R_i^2 - 2 \overline{C s} R_i \cos \delta_y)^{0.5} \quad (6-30)$$

$$\phi_e = \cos^{-1}((\overline{C O}_i^2 + R_i^2 - \overline{C s}^2)/(2 \overline{C O}_i R_i)) \quad (6-31)$$

$$\phi_f = 180 - |\theta_y| - |\delta_y| + \phi_e \quad (6-32)$$

$$\phi_g = \sin(\overline{C O}_i \sin \phi_f / R_i); \quad (6-33)$$

$$\phi_h = 180 - (\phi_f + \phi_g) \quad (6-34)$$

$$\overline{C n} = (R_i^2 + \overline{C O}_i^2 - 2 R_i \overline{C O}_i \cos \phi_h)^{0.5} \quad (6-35)$$

Untuk permukaan cekung, metode untuk  $\overline{C n}$  diturunkan dengan mengacu kepada Gambar 6-5b, dan hasilnya disajikan berikut ini,

$$\overline{C O}_i = (\overline{C q}^2 + R_i^2 - 2 \overline{C q} R_i \cos \delta_y)^{0.5} \quad (6-36)$$

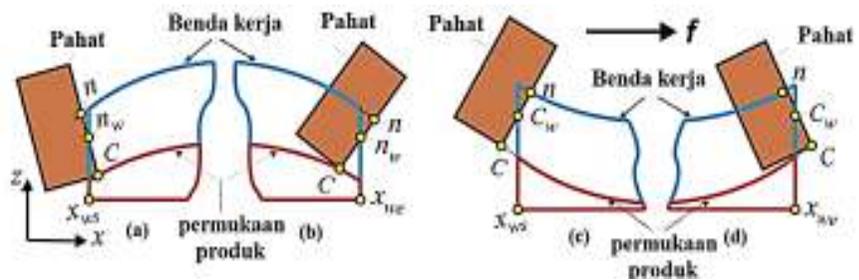
$$\phi_e = \sin^{-1}(R_i^2 \sin(180 - \delta_y) / \overline{C O_i}) \quad (6-37)$$

$$\phi_f = |\theta_A - \phi_e| \quad (6-38)$$

$$\phi_g = 180 - \sin^{-1}(\overline{C O_i} \sin \phi_f / R_i) \quad (6-39)$$

$$\phi_h = 180 - (\phi_f + \phi_g) \quad (6-40)$$

$$\overline{C n} = \overline{C O_i} \sin(\phi_h) / \sin \phi_g \quad (6-41)$$



Gambar 6-6 Titik Persinggungan Pada Dinding Permukaan Benda Kerja

Untuk permukaan lereng dan datar ditentukan menggunakan Persamaan (6-42) dan Persamaan (6-3) berikut ini,

$$\overline{C n} = (\overline{C s} \sin(90 + \gamma)) / \sin(90 - \gamma - \theta_A) \quad (6-42)$$

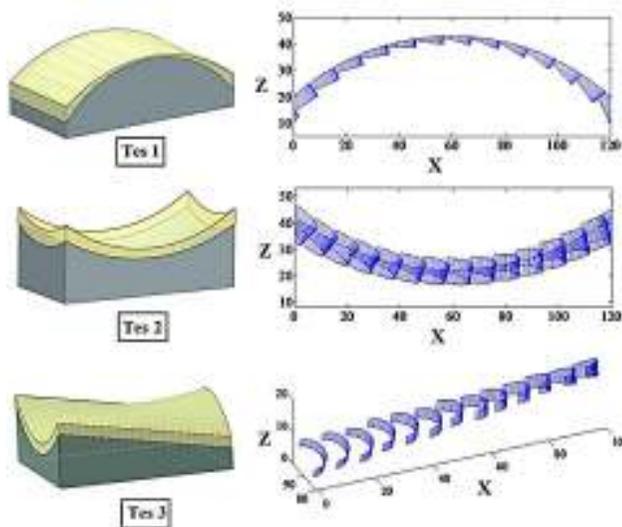
$$\overline{C n} = \overline{C s} / \cos \theta_A \quad (6-43)$$

Akhirnya koordinat  $n_f$  dapat ditentukan menggunakan persamaan parametrik permukaan silinder seperti yang disajikan pada Persamaan (5-9). Sehingga rumus menghitung koordinat  $n_f$  adalah sebagai berikut,

$$n_f = M] S_C(\varphi; l) \quad (6-44)$$

Untuk kondisi di mana pahat berada dekat dengan tepi dari sebuah benda kerja, atau dengan kata lain pahat berada pada titik

awal atau titik akhir dari sebuah lintasan pahat seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6-6, maka *UE-point* dan *LE-point* mungkin saja berada pada dinding permukaan benda kerja yang dilambangkan dengan  $n_w$  dan  $C_w$ . Untuk kasus seperti ini, maka metode *cylindrical-boundary* yang sudah dibahas pada Bab 5 digunakan untuk menentukan *UE-point*.

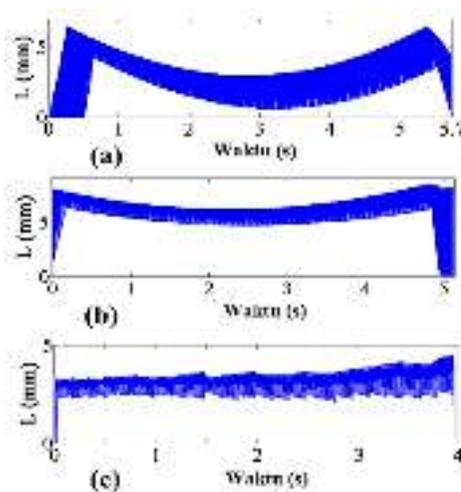


Gambar 6-7 Desain Permukaan Benda Kerja untuk Pengujian dan Bentuk Tatal yang Dihasilkan dari Program Simulasi

### 6.3. Implementasi Metode yang Dikembangkan

Seluruh persamaan yang diturunkan pada Bab ini telah digunakan untuk mengembangkan program simulasi menggunakan Matlab. Program simulasi yang dikembangkan diberi nama *Analytical Boundary Simulation* (ABS). Untuk memastikan akurasi dari metode yang dikembangkan, maka tiga buah permukaan benda kerja yang kompleks seperti ditunjukkan pada Gambar 6-7 telah diuji. Dalam

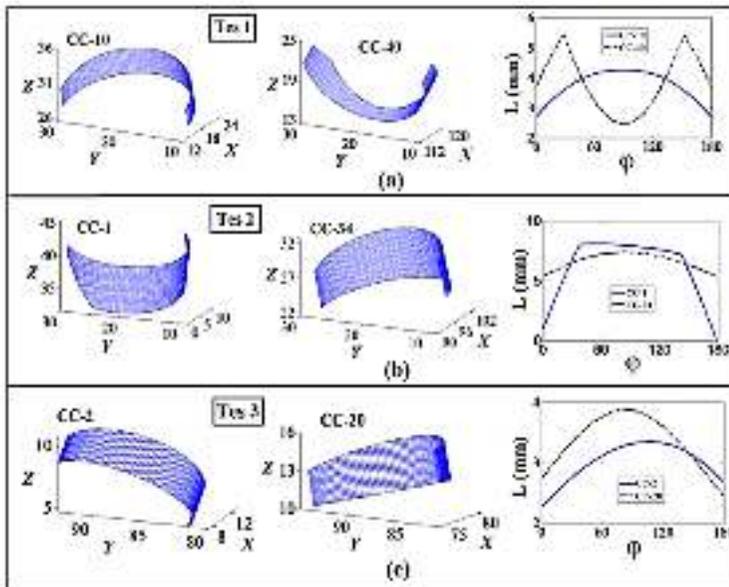
pengujian ini proses pemesinan menggunakan pahat dua gigi dengan diameter 20 mm untuk Tes 1 dan Tes 2. Sedangkan untuk Tes 3 menggunakan pahat datar diameter 12 mm. Orientasi pahat diatur dengan sudut inklinasi sebesar  $10^\circ$  pada Tes 1 dan Tes 3, serta  $15^\circ$  pada Tes 2. Dengan menggunakan ABS, bentuk tatal dapat dihasilkan seperti yang disajikan pada Gambar 6-7 di bagian kanan. Semua pengujian menghasilkan bentuk tatal yang mirip dengan bentuk benda kerja yang dibuang. Hal ini mengindikasikan bahwa metode yang dikembangkan akurat. Panjang tatal untuk satu lintasan pahat dengan kecepatan 5000 rpm dan laju pemakanan 0.3 mm/gigi disajikan pada Gambar 6-8.



Gambar 6-8 Panjang Tatal untuk Satu Lintasan Pahat Pada Masing-Masing Tes

Bentuk dan panjang tatal terhadap sudut persinggungan untuk beberapa *CC-point* ditampilkan pada Gambar 6-9. Panjang pahat dari Tes 1 menghasilkan bentuk yang simetris seperti yang

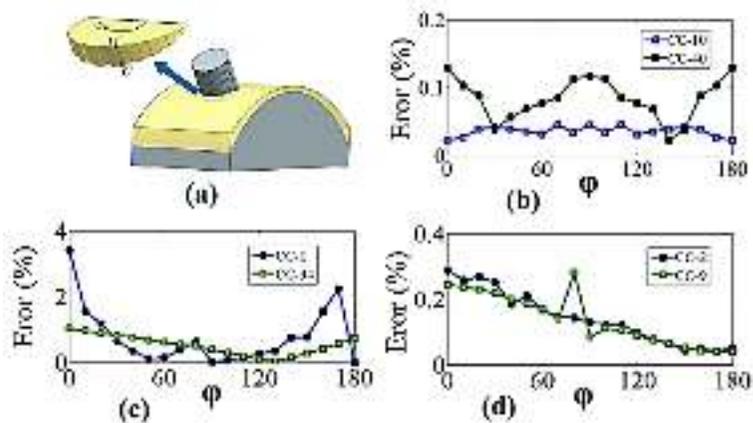
disajikan pada Gambar 6-9a. Untuk CC-40, sebagian besar UE-*point* terletak pada ujung dinding permukaan benda kerja. Hal ini menyebabkan panjang tatal pada bagian tengah rotasi menurun secara drastis. Berbeda dengan Tes 1, panjang tatal untuk Tes 2 tidak simetri. Kondisi ini terjadi karena bentuk benda kerja dan permukaan produk yang dihasilkan sangat kompleks.



Gambar 6-9 Bentuk dan Panjang Tatal pada  $\phi \in \{0, 180\}$  untuk Beberapa CC-*point*

Dibandingkan dengan Tes 1 dan Tes 2, bentuk permukaan benda kerja untuk Tes 3 lebih kompleks. Untuk mengurangi kesalahan yang disebabkan karena tingkat kompleksitas permukaan benda kerja, permukaan benda kerja pada setiap posisi pahat dibagi menjadi dua: pertama adalah permukaan saat sudut persinggungan

$0 < \varphi \leq 90$ , dan yang kedua adalah  $90 < \varphi \leq 180$ . Oleh karena itu maka permukaan benda kerja didiskritisasi menggunakan lebih banyak vektor normal. Kondisi di mana UE-point terletak pada dinding batas awal benda kerja ditunjukkan pada Tes 2 CC-1. Karena LE-point awal berada di luar benda kerja, maka panjang total pada saat awal dan akhir putaran pahat semakin mengecil. Sedangkan untuk kondisi di mana UE-point dan LE-point berada di luar benda kerja disajikan oleh Tes 2 pada CC-1 ketika  $\varphi = 180$ . Pada grafik dapat dilihat bahwa panjang total sama dengan nol.

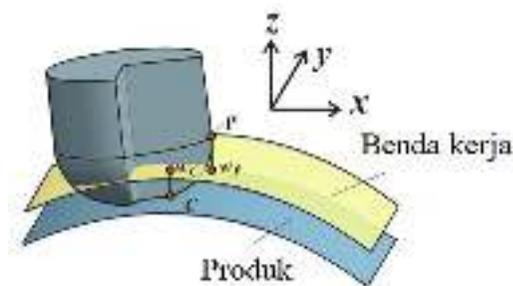


Gambar 6-10 Hasil verifikasi, a) metode mengukur total pada Siemens-NX, b) c) dan d) error pada  $\varphi \in [0 : 10 : 180]$

Meskipun bentuk total mirip dengan bentuk benda kerja yang dibuang, namun akurasi dari metode yang dikembangkan tetap perlu diverifikasi. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan panjang total yang diperoleh dari program simulasi dengan hasil pengukuran menggunakan Siemens-NX. Sebenarnya Siemens-NX tidak memiliki fasilitas untuk menghasilkan data

geometri tatal. Oleh karena itu maka pengukuran dilakukan secara manual di Siemens-NX. Metode verifikasi yang dilakukan sama dengan metode verifikasi yang telah dijelaskan pada Subbab 5.3.4 dan diilustrasikan pada Gambar 6-10a.

Untuk mengukur tingkat akurasi dari metode yang dikembangkan, maka ukuran tatal yang dihasilkan ABS dibandingkan dengan tatal yang diukur menggunakan Siemens-NX. Hasil verifikasi disajikan pada Gambar 6-10b - Gambar 6-10d. Dari grafik yang disajikan dapat dilihat bahwa eror yang dihasilkan dari proses verifikasi sangat kecil. Eror untuk Tes 1 pada CC-10 dan CC-40 terlihat kurang dari 0,13%. Tes 2 menunjukkan bahwa eror yang lebih besar dibandingkan dengan Tes 1 dan Tes 3, khususnya untuk CC-1 ketika pahat masuk dan keluar dari benda kerja. Sesungguhnya hasil tes ini menghasilkan perbedaan yang kecil antara panjang tatal hasil simulasi dengan panjang tatal yang diukur melalui Siemens-NX. Namun karena panjang tatal yang dihasilkan kecil (lihat Gambar 6-10b untuk CC-1), maka persentase erornya menjadi lebih besar. Untuk tes 2, eror yang dihasilkan kurang dari 3,4%. Eror yang kecil juga ditunjukkan pada Tes 3 di mana maksimum eror sebesar 0,38%.



Gambar 6-11 Garis Proyeksi Pada Pahat Toroidal

Meskipun bentuk permukaan benda kerja pada Tes 3 lebih kompleks dibanding dengan Tes 1 dan Tes 2, namun Tes 3 menghasilkan eror yang kecil. Hal ini karena permukaan benda kerja pada setiap *CC-point* dibagi menjadi dua area. Sehingga proses identifikasi dilakukan dua kali dan representasi permukaan benda kerja menjadi lebih akurat. Hanya saja hal ini menyebabkan waktu perhitungan menjadi lebih lama.

#### 6.4. Menentukan *UE-Point* pada Pemesinan Permukaan Kompleks dengan Pahat Toroidal

Prosedur untuk menentukan geometri tatal pada pemesinan menggunakan pahat toroidal lebih rumit dibandingkan dengan pahat datar. Bentuk pahat toroidal yang lebih kompleks menyebabkan posisi *UE-point* dapat terletak di antara dua lokasi, yaitu pada permukaan toroidal atau pada permukaan silindris. Oleh karena itu maka dua buah garis proyeksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-11 harus dicari terlebih dahulu. Koordinat  $w_C(x_{w_C}, y_{w_C}, z_{w_C})$  adalah sebuah titik pada permukaan benda kerja yang dihasilkan dari proyeksi titik  $C(x_C, y_C, z_C)$ . Sedangkan  $w_P(x_{w_P}, y_{w_P}, z_{w_P})$  merupakan titik hasil proyeksi titik  $P(x_P, y_P, z_P)$ . Kedua titik tersebut ( $w_C$  dan  $w_P$ ) perlu ditentukan. Titik  $P$  dan titik  $C$  secara berurutan adalah titik pada permukaan pahat yang terletak pada bagian paling bawah permukaan toroidal dan titik yang terletak pada bagian paling atas. Garis proyeksi  $\overline{C w_C}$  dan  $\overline{P w_P}$  merupakan acuan awal dalam menentukan bidang kontak pahat dan benda kerja pada perhitungan lebih lanjut. Titik persinggungan diperoleh dengan memutar garis proyeksi menggunakan sudut orientasi pahat.

#### 6.4.1. Menentukan Lokasi Titik Persinggungan

Karena persamaan untuk menentukan permukaan toroidal dan silinder berbeda, maka metode untuk menentukan UE-*point* ketika berada pada sisi toroidal juga berbeda dengan UE-*point* ketika berada pada sisi silinder. Oleh karena itu maka perlu ditentukan terlebih dahulu apakah UE-*point* terletak pada permukaan toroidal, atau pada permukaan silinder, atau bahkan tidak terjadi persinggungan antara pahat dan benda kerja. Cara untuk menentukannya adalah dengan menghitung nilai  $D_C$ , yang merupakan  $z_{w_C} - z_C$ , dan  $D_P$  adalah  $z_{w_P} - z_P$  seperti terlihat pada Gambar 6-11.

Sebelum menentukan  $D_C$  dan  $D_P$ , koordinat  $w_C(x_{w_C}, y_{w_C}, z_{w_C})$  dan  $w_P(x_{w_P}, y_{w_P}, z_{w_P})$  harus ditentukan terlebih dahulu.  $w_C$  dan  $w_P$  adalah titik hasil proyeksi dari titik  $C(x_C, y_C, z_C)$  dan titik  $P(x_P, y_P, z_P)$ , maka  $\{x_{w_C}, y_{w_C}, x_{w_P}, y_{w_P}\}$  adalah sama dengan  $\{x_C, y_C, x_P, y_P\}$ . Sementara itu  $z_{w_C}$  diperoleh dengan cara menghitung sumbu-z pada  $S_x$  terhadap nilai  $x_C$ , dan sumbu-z pada  $S_y$  terhadap nilai  $y_C$ . Perhitungan dimulai pada permukaan  $S_x$  di mana nilai sumbu-z dapat dihitung dengan cara membandingkan  $x_C$  dengan koordinat dan orientasi dari vektor acuan  $v_1$ .

Dengan cara yang sama seperti mencari  $D_C$ , selanjutnya  $x_P$  dan  $y_P$  digunakan untuk menghitung  $D_P$ . Setelah nilai  $D_C$  dan  $D_P$  diperoleh, maka lokasi UE-*point* dapat ditentukan melalui aturan berikut ini:

1. Jika  $D_C > 0$  dan  $D_P \leq 0$ : UE-*point* terletak pada permukaan toroidal, dan selanjutnya  $\overline{C w_C}$  menjadi garis proyeksi.
2. Jika  $D_C > 0$  dan  $D_P > 0$ : UE-*point* terletak pada permukaan silinder, dan selanjutnya  $\overline{P w_P}$  menjadi garis proyeksi.

3. Jika  $D_c < 0$  dan  $D_p < 0$ : tidak ada persinggungan antara pahat dan benda kerja.

Garis proyeksi adalah garis yang digunakan sebagai garis acuan awal untuk menghitung panjang tatal.

Tabel 6-1 Variabel untuk Sudut Persinggungan 0, 90, dan 180

Variabel	$\varphi \{0\}$	$\varphi \{90\}$	$\varphi \{180\}$
$R_1$	$R_x$	$R_y$	$R_x$
$R_2$	$R_y$	$R_x$	$R_y$
$\varepsilon_1$	$\varepsilon_{x1}$	$\varepsilon_{y1}$	$\varepsilon_{x1}$
$\varepsilon_2$	$\varepsilon_{y1}$	$\varepsilon_{x1}$	$\varepsilon_{y1}$
$\delta_1$	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_x$
$\delta_2$	$\delta_y$	$\delta_x$	$\delta_y$
$\theta_1$	$\theta_B/\theta_{Bx}$	$\theta_A/\theta_{Ax}$	$\theta_B/\theta_{Bx}$
$\theta_2$	$\theta_A/\theta_{Ax}$	$\theta_B/\theta_{Bx}$	$-\theta_A/\theta_{Ax}$
$S_1$	$S_x$	$S_y$	$S_x$
$S_2$	$S_y$	$S_x$	$S_y$

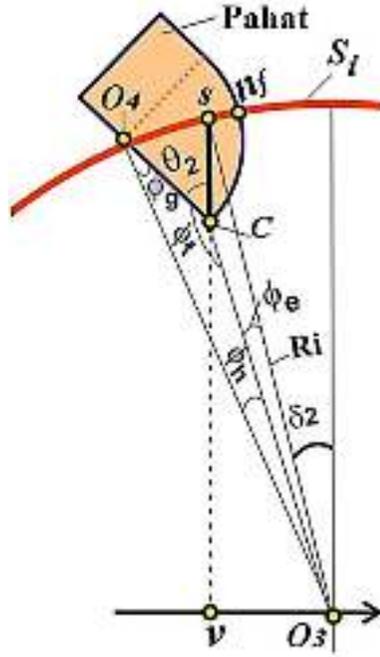
#### 6.4.2. Menentukan UE-Point

Jika UE-point dideteksi berada pada sisi silinder, maka koordinat UE-point ditentukan dengan cara yang sama seperti pada pahat datar sebagaimana yang sudah dibahas pada subbab sebelumnya. Namun jika UE-point berada pada sisi toroidal, maka metode yang berbeda harus digunakan. Untuk menghitung UE-point pada setiap sudut persinggungan, maka terlebih dahulu ditentukan UE-point pada sudut persinggungan 0, 90, dan 180. Geometri tatal pada sudut persinggungan lainnya akan dicari menggunakan metode interpolasi. Oleh karena itu maka agar rumus yang dihasilkan dapat diterapkan secara umum, maka beberapa variabel perlu didefinisikan terlebih dahulu. Variabel-variabel tersebut beserta nilainya dapat dilihat pada Tabel 6-1.

Setelah garis proyeksi diperoleh maka selanjutnya garis tersebut dirotasi menggunakan sudut orientasi pahat,  $\theta_1$  and  $\theta_2$ . Kedua proses rotasi tersebut merupakan bagian dari tiga prosedur yang harus dilakukan untuk menghitung *UE-point*. Persinggungan antara pahat dan benda kerja akan ditentukan pada prosedur ketiga. Pada prosedur ketiga, sisi toroidal pahat akan direpresentasikan sebagai sebuah lingkaran. Semua prosedur ini harus dilakukan secara berurutan, kecuali pada kondisi tertentu mungkin saja terdapat prosedur yang dilewati. Untuk prosedur pertama, metode rotasi garis proyeksi sebagaimana dibahas pada Subbab 6.2.2.1, dan metode untuk memperoleh permukaan miring di Subbab 6.2.2.2 digunakan juga pada permukaan toroidal. Untuk prosedur kedua, meskipun prosedur yang digunakan sama dengan prosedur pada pahat datar, namun tujuannya berbeda. Prosedur rinci untuk memperoleh  $n_f$  akan diturunkan dan didiskusikan pada subbab setelah ini.

#### 6.4.2.1. Memutar Garis Terputar Menggunakan $\theta_2$

Pada prosedur ini, garis terputar yang diperoleh dari putaran pertama oleh  $\theta_1$  diputar lagi menggunakan  $\theta_2$ . Meskipun koordinat *UE-point* akan diperoleh pada prosedur ketiga, namun jika  $S_2$  berbentuk kurva maka  $\phi_g$  dan panjang garis  $\overline{O_3O_4}$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-12 perlu dicari di prosedur kedua. Sebaliknya, perhitungan dapat lompat ke prosedur berikutnya.  $\phi_g$  dan  $\overline{O_3O_4}$  digunakan sebagai input untuk menghitung *UE-point* pada prosedur ketiga. Titik  $O_4$  adalah titik pusat pada sisi toroidal pahat yang bisa terletak di dalam maupun di luar permukaan benda kerja. Panjang  $\overline{bO_4}$  adalah sama dengan radius sisi toroidal. Garis  $\overline{O_3O_4}$  adalah jarak antara pusat dari sisi toroidal dan pusat dari permukaan benda kerja  $S_i$ . Dengan menggunakan persamaan trigonometri,  $\phi_g$  dan  $\overline{O_3O_4}$  dihitung sebagai berikut,



Gambar 6-12 Putaran Garis Proyeksi pada  $S_i$  Ketika UE-point pada Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Kurva Benda Kerja

$$\overline{C O_3} = (\overline{C s}^2 + R_i^2 - 2 \overline{C s} R_i \cos \delta_2)^{0.5} \quad (6-45)$$

$$\phi_e = \cos^{-1}((\overline{C O_3}^2 + R_i^2 - \overline{C s}^2 / 2 \overline{C O_3} R_i)) \quad (6-46)$$

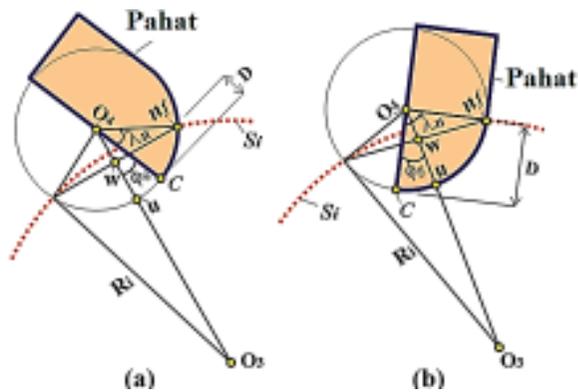
$$\phi_f = 180 - |\theta_2| - |\delta_2| + \phi_e \quad (6-47)$$

Ketika  $\theta_2 < 0$  dan  $\delta_2 > 0$  atau sebaliknya, maka  $\phi_f$  berubah jadi,

$$\phi_f = 180 - |\theta_2| - |\delta_2 + \phi_e| \quad (6-48)$$

$$\overline{O_3 O_4} = (\overline{C O_4}^2 + \overline{C O_3}^2 - 2 \overline{C O_4} \overline{C O_3} \cos \phi_f)^{0.5} \quad (6-49)$$

$$\phi_g = \sin\left(\frac{\overline{C O_3} \sin \phi_f}{\overline{O_3 O_4}}\right) \quad (6-50)$$



Gambar 6-13 Titik Persinggungan Antara Permukaan Toroidal Pahat dan Permukaan Melengkung Benda Kerja, a)  $\theta_2$  Positif, b)  $\theta_2$  Negatif

#### 6.4.2.2. Menghitung Sudut Toroidal UE-Point

Ketika persinggungan antara pahat dan benda kerja hanya terjadi pada permukaan toroidal, maka  $n_f$  dihitung dengan cara mentransformasikan persamaan parametrik permukaan toroidal seperti yang disajikan pada Persamaan (5-10). Sebelum proses transformasi sistem koordinat dilakukan, sudut persinggungan toroidal perlu ditentukan terlebih dahulu. Metode untuk menghitung sudut toroidal pada setiap bentuk permukaan akan dijelaskan setelah ini. Pada tahap ini, pahat toroidal akan direpresentasikan sebagai sebuah lingkaran dengan radius  $r$ .

##### 1. Permukaan Melengkung

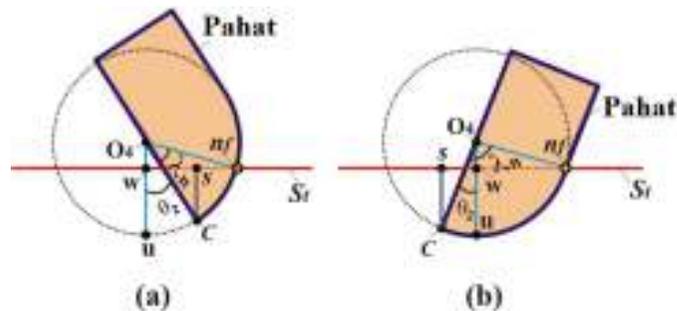
$n_f$  diperoleh menggunakan metode persinggungan dua lingkaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6-13. Untuk kasus seperti ini, sisi toroidal pahat dan permukaan benda kerja akan dianggap sebagai sebuah lingkaran dengan radius masing-masing secara

berurutan yaitu  $r$  dan  $R_i$ . Sudut  $\phi_g$  yang diperoleh pada prosedur kedua selanjutnya digunakan untuk menentukan orientasi pahat. Kemudian garis  $\overline{wu}$  dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$\overline{wu} = (r - r^2 - R_i^2 + \overline{O_3O_4}^2) / (2 \overline{O_3O_4}) \quad (6-51)$$

Dalam praktiknya, pahat dapat berputar baik pada arah positif (Gambar 6-13a) atau pada arah negatif (Gambar 6-13b). Sebagai contoh, ketika orientasi pahat positif pada  $\varphi\{0\}$ , maka arahnya akan menjadi negatif pada  $\varphi\{180\}$ , dan sebaliknya. Sudut toroidal dapat dihitung secara umum sebagai berikut,

$$\lambda_n = \cos^{-1}\left(1 - \left(\frac{\overline{wu}}{r}\right)\right) + \phi_g \quad (6-52)$$



Gambar 6-14 Titik Persinggungan antara Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Datar Benda Kerja, a) Ketika  $\theta_2$  Positif, b) Ketika  $\theta_2$  Negatif

## 2. Permukaan Datar

Ketika  $S_2$  adalah permukaan datar, maka metode persinggungan dua lingkaran tidak dapat diterapkan karena permukaan benda kerja tidak dapat direpresentasikan sebagai sebuah lingkaran. Selanjutnya garis  $\overline{wu}$  dan sudut toroidal dihitung dengan mengacu kepada Gambar 6-14.

$$\overline{wu} = (r - r \cos \theta_2) + \overline{cs} \quad (6-53)$$

$$\lambda_n = \cos^{-1}\left(1 - \left(\frac{\overline{wu}}{r}\right)\right) + \theta_2 \quad (6-54)$$

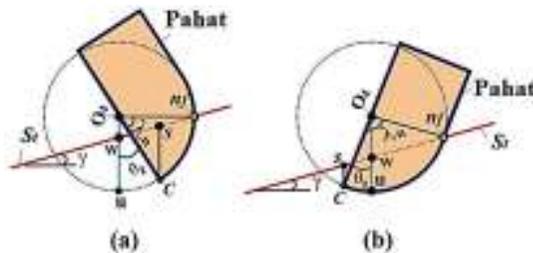
### 3. Permukaan Miring

Garis  $\overline{wu}$  dan sudut toroidal untuk permukaan miring sebagaimana yang disajikan pada Gambar 6-15 dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$\overline{wu} = \overline{cs} - r(1 + \sin \theta_2 \tan \gamma - \cos \theta_2) \quad (6-55)$$

$$\lambda_n = 90 - \gamma + \theta_2 - \sin^{-1}\left\{\left(\frac{(r - \overline{wu}) \sin(90 - \gamma)}{r}\right)\right\} \quad (6-56)$$

Akhirnya,  $n_f$  dihitung menggunakan Persamaan (5-10)



Gambar 6-15 Titik Persinggungan antara Sisi Toroidal Pahat dan Permukaan Miring Benda Kerja, a) Ketika  $\theta_2$  Positif, b) Ketika  $\theta_2$  Negatif

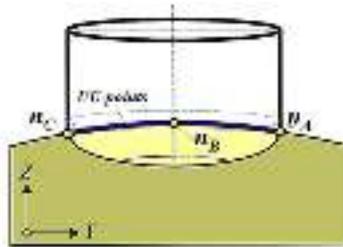
#### 6.4.2.3. UE-Point untuk Setiap Sudut Persinggungan

Metode menghitung UE-point yang telah diuraikan pada subbab sebelumnya hanya untuk menentukan UE-point pada  $\varphi \{0, 90, 180\}$ . Ilustrasi UE-point untuk ketiga posisi ini disajikan pada Gambar 6-16. UE-point yang diperoleh pada tahap ini disebut dengan  $n_A(\varphi = 0)$ ,  $n_B(\varphi = 90)$  dan  $n_C(\varphi = 180)$ . Untuk UE-point pada sudut persinggungan lainnya akan ditentukan dengan cara interpolasi dari

ketiga UE-*point* tersebut. Koordinat  $n_f(x_{n_f}, y_{n_f}, z_{n_f})$  untuk setiap sudut persinggungan dapat ditentukan dengan cara menentukan  $z_{n_f}$  terlebih dahulu. Untuk mengurangi terjadinya eror, interpolasi dilakukan dengan cara membagi permukaan benda kerja menjadi dua bagian, yaitu UE-*point* pada  $0 \leq \varphi < 90$  dan UE-*point* pada  $90 < \varphi < 180$ .

$$z_{n_f} = z_{n_A} + (z_{n_B} - z_{n_A}) \sin \varphi ; \text{ untuk } 0 \leq \varphi < 90 \quad (6-57)$$

$$z_{n_f} = z_{n_C} + (z_{n_B} - z_{n_C}) \sin \varphi ; \text{ untuk } 90 < \varphi < 180 \quad (6-58)$$

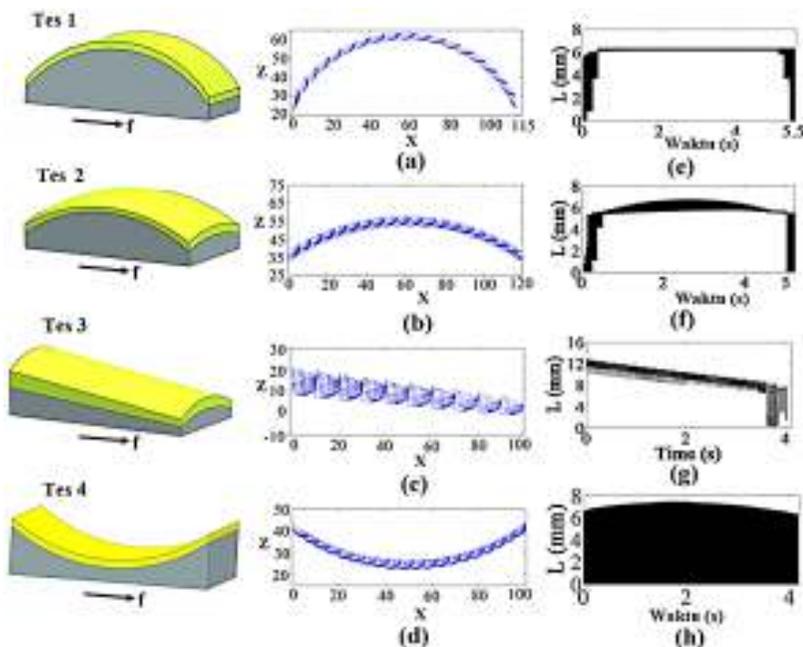


Gambar 6-16 UE-*point* pada  $\varphi \{0, 90, 180\}$

Setelah  $z_{n_f}$  diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan lokasi UE-*point*, apakah terletak di sisi silinder atau sisi toroidal. Metode menentukan lokasi UE-*point* sebagaimana yang sudah dijelaskan pada bagian 6.4.1 dapat diterapkan. Kemudian UE-*point* pada sisi toroidal dapat ditentukan setelah sudut toroidalnya diperoleh. Sudut toroidal diperoleh menggunakan metode *Z-toroidal*. Jika UE-*point* berada pada sisi silinder, maka panjang kontak antara pahat dan benda kerja dihitung menggunakan metode *Z-cylindrical*. Sudut toroidal dan panjang bidang kontak ditentukan berdasarkan  $z_{n_f}$  yang diperoleh. Setelah sudut toroidal atau panjang bidang kontak diperoleh maka koordinat UE-*point* dapat ditentukan.

### 6.4.3. Implentasi dan Pembahasan

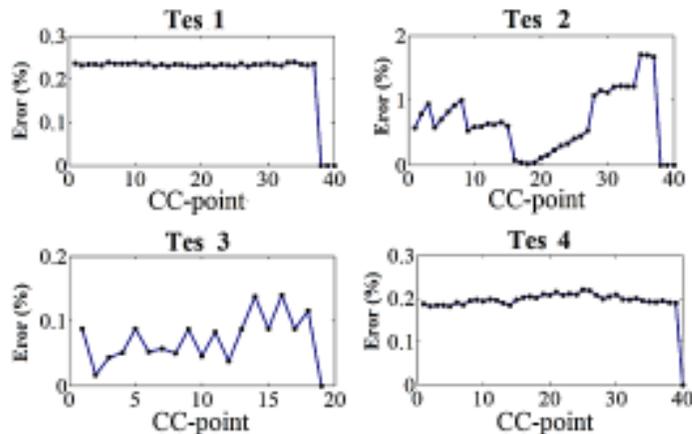
Seluruh persamaan yang dikembangkan untuk menghitung persinggungan antara pahat dan benda kerja pada pemesinan halus menggunakan pahat toroidal telah dikembangkan menjadi program simulasi. Untuk melihat akurasi metode yang telah dikembangkan, maka dilakukan pengujian menggunakan empat model benda kerja dengan berbagai bentuk permukaan seperti yang disajikan pada Gambar 6-17. Kondisi pemesinan yang digunakan pada saat pengujian adalah laju pemakanan 0,3 mm/gigi dan kecepatan potong 5000 rpm. Pahat toroidal dua gigi dengan diameter 20 mm dan radius minor 5 mm digunakan sebagai pahat.



Gambar 6-17 Model Pengujian, a, b, c, d) Bentuk Tatal dan e, f, g, h) Panjang Tatal

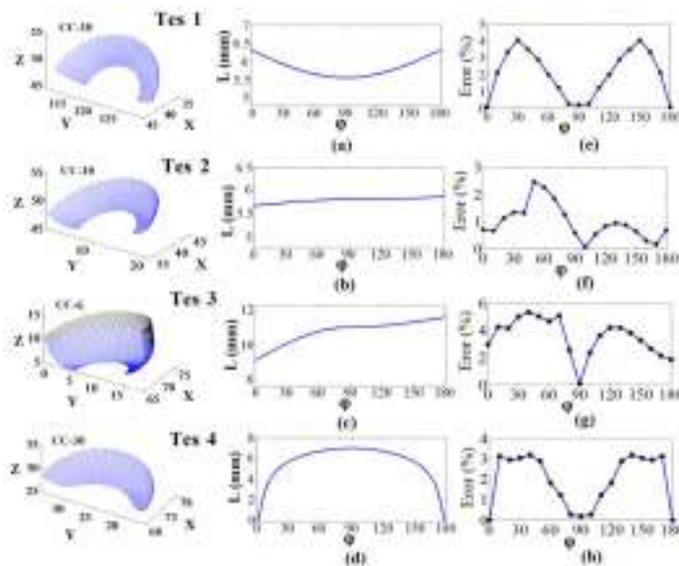
Menggunakan program simulasi yang dikembangkan, bentuk geometri total dan koordinat UE-*point* dapat diperoleh. Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6-17a - Gambar 6-17d adalah geometri total untuk setiap CC-*point*. Dapat dilihat bahwa bentuk total mirip dengan bentuk permukaan benda kerja. Perubahan panjang total untuk satu lintasan pahat disajikan pada Gambar 6-17e - Gambar 6-17h.

Pada Tes 1 bertujuan untuk menguji metode terhadap permukaan kombinasi antara permukaan melengkung dan permukaan datar. Pada pengujian ini, jarak normal antara pahat produk dan benda kerja dirancang konstan. Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6-17a dapat disimpulkan bahwa persinggungan hanya terjadi pada sisi toroidal pahat. Lebih jauh, panjang total seperti yang disajikan pada Gambar 6-17e bernilai relatif konstan. Penurunan panjang total pada CC-*point* 37 hingga CC-*point* 40 terjadi disebabkan beberapa bagian dari pahat terletak di luar dari batas benda kerja.



Gambar 6-18 Error pada Setiap CC-Point

Pada Tes 2, pemesinan dilakukan pada produk dan benda kerja berbentuk kompleks. Permukaan produk dan benda kerja merupakan kombinasi dari permukaan cembung dan cekung. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa persinggungan hanya terjadi pada sisi toroidal pahat seperti yang terlihat pada Gambar 6-17b. Sedikit variasi panjang tatal dihasilkan seperti yang disajikan pada Gambar 6-17f. Tes 3 dimaksudkan untuk menguji metode yang dikembangkan pada permukaan dengan kombinasi permukaan miring dan datar. Dari hasil pengujian pada Gambar 6-17c dapat dilihat bahwa UE-point terletak di sisi silinder pahat kecuali pada CC-point bagian akhir di mana tidak terjadi kontak pada sebagian permukaan pahat. Hal ini terjadi karena posisi pahat telah melewati batas ujung benda kerja. Dari Gambar 6-17g dapat dilihat bahwa panjang tatal menurun secara bertahap.



Gambar 6-19 Bentuk Geometri Tatal, Panjang Tatal dan Error untuk  $\epsilon \in \{0, 180\}$

Untuk Tes 4, benda kerja dengan kombinasi permukaan cekung dan permukaan datar dimesin menggunakan pahat toroidal. Pada pengujian ini orientasi pahat dimiringkan dengan sudut  $10^\circ$ . Dari Gambar 6-17h dapat dilihat bahwa terdapat sedikit variasi dalam hal panjang tatal. Bentuk tatal untuk satu lintasan pahat pada semua model benda kerja seperti yang disajikan pada Gambar 6-17 mirip dengan bentuk permukaan benda kerja. Hasil ini mengindikasikan bahwa metode yang dikembangkan akurat. Meski demikian, verifikasi untuk memastikan tingkat akurasi metode yang dikembangkan perlu dilakukan. Verifikasi dilakukan dengan cara yang sama dengan metode verifikasi pada proses semihalus maupun proses halus menggunakan pahat datar.

Hasil verifikasi disajikan pada Gambar 6-18. Dari grafik pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil pengujian menghasilkan eror yang relatif kecil. Tes 1 menghasilkan panjang tatal yang relatif konstan dan eror yang muncul sekitar 0,23%. Untuk Tes 2, eror yang muncul kurang dari 1,7%, sedangkan untuk Tes 3 di bawah 0,14%. Sementara itu Tes 4 menghasilkan eror maksimum sebesar 0,21%. Verifikasi yang dilakukan menghasilkan eror yang sangat kecil dan ini menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi yang baik.

Bentuk geometri tatal untuk setiap sudut persinggungan disajikan pada Gambar 6-19. Untuk Tes 1 pada CC-10 dan Tes 2 pada CC-10, semua *UE-point* terletak pada permukaan toroidal. Sementara untuk Tes 3 pada CC-6, *UE-point* terletak pada sisi silinder. Untuk Tes 4 pada CC-30, *UE-point* juga terletak sisi toroidal. Namun panjang tatal untuk setiap sudut persinggungan sangat fluktuatif karena orientasi pahat menggunakan sudut inklinasi. Verifikasi juga dilakukan untuk memastikan akurasi metode yang dikembangkan. Hasil verifikasi ditampilkan pada Gambar 6-19e – Gambar 6-19h. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa eror yang dihasilkan relatif sangat kecil untuk semua pengujian.

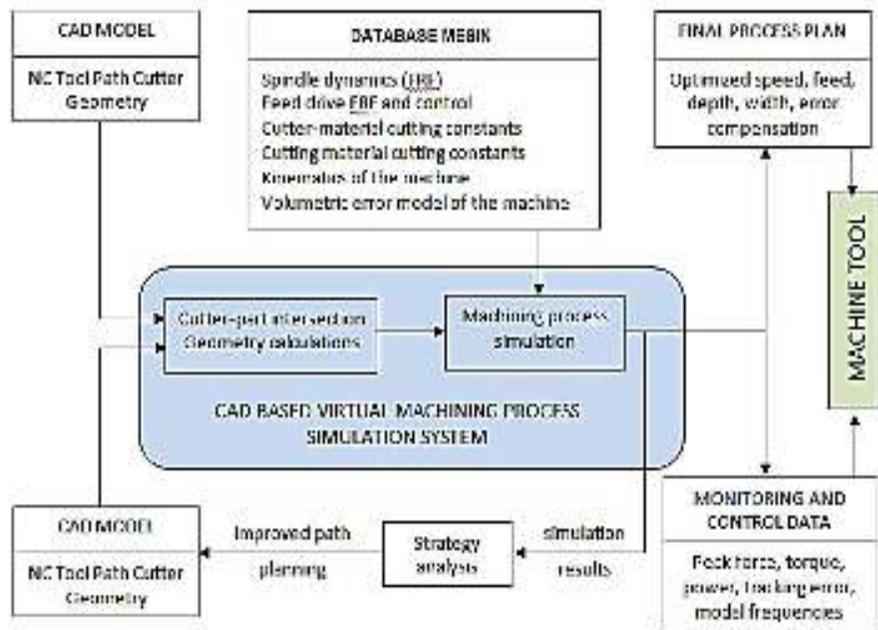
# **BAB 7.**

## **OPTIMASI PROSES PEMESINAN PADA MESIN 5 SUMBU**

Meskipun perkembangan mesin perkakas seperti mesin bubut dan mesin freis sangat pesat, namun mekanisme untuk menentukan parameter pemesinan masih banyak dilakukan secara konvensional. Parameter pemesinan seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan lebar pemotongan cenderung dipilih lebih rendah agar tidak terjadi kerusakan terhadap benda kerja, pahat, bahkan mesin selama proses pemotongan berlangsung. Umumnya parameter pemesinan yang sama digunakan untuk seluruh proses pemesinan. Sehingga proses pemesinan berlangsung secara tidak efisien.

Banyak studi yang sudah dilakukan untuk mengembangkan pemesinan virtual yang mampu memprediksi kinerja proses pemesinan seperti gaya potong, kualitas permukaan, defleksi pahat, dan daya yang digunakan. Altintas [17] merumuskan sebuah diagram alir yang komprehensif tentang simulasi pemesinan dan skema optimasi sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 7-1. Skema optimasi mempertimbangkan banyak faktor, di antaranya adalah geometri pahat, mekanik dan dinamik proses pemesinan freis, serta kesalahan volumetri untuk mengkompensasi kesalahan pemesinan dan mengurangi waktu pemesinan.

Optimasi pemesinan secara virtual memiliki dua bagian, pemodelan geometri dan pemodelan proses. Pemodelan geometri membutuhkan informasi yang presisi tentang geometri tatal dari proses pemesinan untuk digunakan dalam menghitung besar gaya potong. Menentukan geometri tatal tergantung dari sistem pemesinan yang diterapkan. Semakin kompleks benda kerja yang dimesin maka semakin menantang pekerjaan menghitung geometri tatal. Beberapa metode untuk menentukan geometri tatal telah diuraikan pada BAB 3 – BAB 6.



Gambar 7-1 Diagram Proses Optimasi dan Simulasi [17]

Banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk optimasi proses pemesinan pada pemesinan kompleks. Tujuan optimasi ini

adalah untuk meningkatkan akurasi dan sekaligus menurunkan biaya. Waktu pemesinan dan biaya adalah faktor utama dalam persaingan dunia industri saat ini. Kemampuan untuk menghasilkan proses yang efisien secara otomatis adalah langkah maju dalam proses otomatisasi yang bertujuan untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produk. Hal ini merupakan kebutuhan yang sangat penting pada proses pemesinan freis 5 sumbu dalam mendukung produksi di industri dirgantara, otomotif, medis, dan industri cetakan.

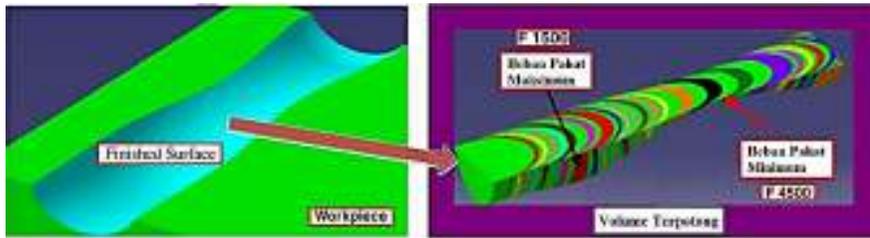
Salah satu metode optimasi pemesinan yang banyak dilakukan adalah penjadwalan laju pemakanan (*feedrate scheduling*). Laju pemakanan merupakan parameter penting dalam proses pemesinan sehingga harus ditentukan secara cermat. Laju pemakanan yang tinggi dapat mempercepat proses pemesinan. Namun di sisi lain, laju pemakanan yang terlalu tinggi akan memberi dampak negatif akibat meningkatnya gaya potong. Di antara dampak yang dapat muncul adalah menimbulkan defleksi pahat, permukaan produk menjadi kasar, dan pahat semakin cepat aus. Oleh karena itu maka menentukan laju pemakanan yang optimal merupakan hal yang penting dalam upaya meningkatkan efisiensi proses pemesinan.

Meskipun banyak hasil penting yang telah dihasilkan dari penelitian dalam tiga dekade belakangan ini, namun menentukan laju pemakanan yang optimal masih terus perlu dikembangkan. Sebagian besar sistem CAD/CAM yang tersedia saat ini masih menggunakan metode konservatif. Umumnya pemesinan berlangsung menggunakan laju pemakanan yang konstan untuk seluruh proses pemesinan. Laju pemakanan yang dipilih adalah laju pemakanan yang rendah agar tidak berbahaya untuk semua kondisi pemakanan sepanjang lintasan pahat. Saat ini semua sistem CAD/CAM telah mampu menghasilkan dokumen lintasan pahat,

atau yang dikenal dengan *CL-file*. *CL-file* yang dihasilkan mempertimbangkan bentuk geometri dan volume terpotong (*material removed*). Namun kondisi ini umumnya masih terbatas pada proses pemakanan sederhana pada mesin 3 sumbu.

Selama proses pemesinan berlangsung, gaya potong mesin freis perlu dikendalikan agar tetap berada pada kondisi yang diizinkan. Besar gaya potong sangat terkait dengan upaya untuk menurunkan kemungkinan terjadinya defleksi pada pahat dan menghindarkan terjadinya pahat aus atau pecah. Hal ini yang menyebabkan gaya potong menjadi salah satu parameter pemesinan terpenting dalam pemesinan freis. Menjaga agar gaya potong konstan selama proses pemotongan berlangsung merupakan hal yang penting. Hal ini bertujuan agar diperoleh stabilitas proses pemesinan yang baik dan dapat meningkatkan topografi, tekstur dan geometri permukaan benda kerja. Dengan memilih laju pemakanan yang tetap (metode konservatif) yang diperoleh dari kondisi pemotongan maksimum, maka pahat akan aman dan hemat. Namun dampaknya adalah waktu pemesinan bertambah dan terjadinya fluktuasi defleksi pahat. Semua kondisi itu pada akhirnya akan menurunkan produktivitas. Hanya saja laju pemakanan tetap yang konservatif masih banyak digunakan. Hal ini disebabkan karena terbatasnya teknologi optimasi proses pemesinan yang tersedia.

Uraian di atas merupakan sebab mengapa optimasi pemesinan melalui pengaturan laju pemakanan terus berkembang. Metode ini diterapkan dengan cara mengatur laju pemakanan agar gaya potong yang muncul tetap. Sebagai contoh ditunjukkan pada Gambar 7-2 di mana laju pemakanan diatur berdasarkan volume terpotong. Semakin besar volume material terbuang maka laju pemakanan akan semakin kecil, dan sebaliknya.



Gambar 7-2 Laju Pemakanan Berbeda untuk Beban Pahat Berbeda [20]

Berbagai metode optimasi pada proses pemesinan CNC telah dikembangkan selama lebih dari 70 tahun. Salah satu metode yang paling menarik perhatian adalah penjadwalan laju pemakanan atau dikenal dengan *feedrate scheduling*. Strategi ini dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yaitu a) Optimasi kendali adaptif secara *online*, dan b) optimasi berbasis simulasi komputer (kendali adaptif secara *offline*). Istilah “adaptif” digunakan pada proses pemesinan untuk menggambarkan mekanisme penyesuaian yang dilakukan terhadap perubahan kondisi proses pemotongan. Menurut ilmu kontrol, pengendali adaptif (*adaptif controller*) didefinisikan sebagai pengendali yang mengubah parameter berdasarkan kondisi terkini dari sebuah sistem kendali.

Metode kendali adaptif secara *online* (*AC-Online*) adalah metode optimasi yang dilakukan langsung pada saat proses pemesinan berlangsung. Metode ini berbasis pada perangkat keras di mana berbagai jenis sensor digunakan. Tujuannya adalah agar proses pemesinan berlangsung optimal dan aman. Sedangkan kendali adaptif secara *offline* (*AC-Offline*) adalah metode optimasi yang dilakukan sebelum proses pemesinan berlangsung. Metode ini dilakukan melalui proses simulasi menggunakan perangkat lunak dan komputer. Metode *AC-Offline* cenderung lebih proaktif dibanding *AC-*

*Online* yang reaktif. Selain itu, metode ini relatif lebih fleksibel dan serba guna. Akurasi hasil proses pemesinan yang kompleks dapat ditingkatkan baik melalui pendekatan *online* maupun *offline*.

### 7.1. Optimasi Laju Pemakanan Secara Online

Penelitian yang mengembangkan metode ini relatif tidak banyak jika dibandingkan dengan studi pengembangan metode optimasi AC-*offline*. Studi metode optimasi AC-*Online* didasarkan pada kesimpulan bahwa metode *offline* memiliki banyak keterbatasan. Keterbatasan itu menyangkut kondisi pemesinan yang tidak semuanya dapat diakomodasi dalam proses simulasi. Sehingga hasil akhir yang diperoleh sering tidak sesuai dengan kondisi pemesinan sebenarnya.

Metode AC-*Online* dikembangkan dengan melengkapi perangkat mesin CNC menggunakan berbagai sensor agar dapat mengukur berbagai kondisi pemesinan. Kondisi pemesinan yang dideteksi di antaranya adalah defleksi pahat, gaya potong, torsi, getaran, temperatur, daya motor, arus motor, dan parameter lainnya. Kondisi pemesinan tersebut yang kemudian diolah untuk menentukan parameter pemotongan seperti laju pemakanan dan kecepatan spindel.

Pada metode AC *online*, parameter pemotongan secara konsisten berubah berdasarkan hasil pengukuran dan pengolahan data kondisi pemesinan. AC *online* mendeteksi kondisi pemesinan dalam waktu nyata (*real time*). Tantangannya adalah bagaimana sistem kontrol mampu menyesuaikan parameter untuk mengakomodir perubahan kondisi pemotongan yang cepat. Pada proses pemesinan freis, *adaptive controllers* tidak dapat menghindari kondisi *overshoot* yang dihasilkan karena adanya waktu tunda (*delay time*) informasi yang dihasilkan oleh kontroler dan sistem kontrol [20-22].

Untuk mengatasi masalah tersebut, Noouri dan Fussel [23] mengembangkan metode optimasi *offline* dengan kendali lup tertutup (*closed loop control*). Metode ini dikembangkan dengan asumsi bahwa optimasi *feedrate* merupakan dampak dari kondisi persinggungan pahat dan benda kerja yang berubah secara drastis. Altintas [24] mengembangkan sistem kendali di mana kontroler mampu secara internal mengoptimasi keluaran untuk memanipulasi variabel. Sistem kendali ini lebih tangguh untuk kondisi pemotongan yang sangat bervariasi.

Metode AC *online* sangat tepat untuk kondisi tertentu di mana pahat potong sangat *rigid* sehingga mampu menahan beban yang besar. Namun metode ini sering mengalami masalah dalam hal setup instrumen pendukung. Selain itu terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam menggunakan metode AC-*online*, di antaranya adalah:

1. Sensor yang digunakan sangat mahal.
2. Untuk mendapatkan hasil yang baik maka sensor harus dipasang sedekat mungkin dengan daerah pemotongan, namun hal ini sulit dilakukan.
3. Banyak sensor yang tidak tahan digunakan pada kondisi yang berat seperti pada kondisi pemesinan berlangsung.
4. Setiap mesin CNC membutuhkan satu alat kendali adaptif.
5. Optimasi dilakukan untuk setiap benda kerja yang dihasilkan.

Meskipun AC *online* telah dipasang dan digunakan secara baik sebagai perangkat sistem elektro-mekanik mesin, namun tetap saja diperlukan pengaturan ulang untuk setiap kali penggunaan. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah reliabilitas instrumen dan aspek perawatan yang dibutuhkan.

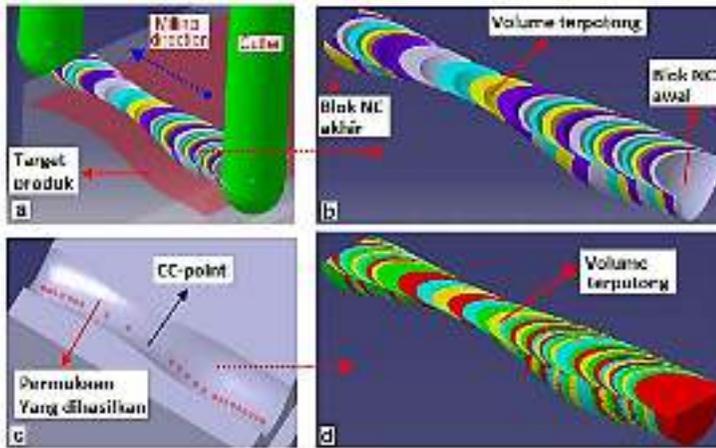
## 7.2. Optimasi Laju Pemakanan Secara *Offline*

Berbanding terbalik dengan *AC-online*, optimasi laju pemesinan secara *offline* terus berkembang. Hal ini juga didukung dengan semakin meningkatnya kemampuan komputer dalam mengolah data dalam ukuran besar. Optimasi secara *offline* merupakan sistem yang bersifat proaktif dibanding dengan sistem *online* yang reaktif. Sistem optimasi *offline* disebut proaktif karena proses optimasi dilakukan menggunakan metode penjadwalan laju pemakanan. Dengan sistem ini maka proses optimasi dilakukan berdasarkan perkiraan kondisi pemotongan sebelum proses pemesinan dilaksanakan. Sedangkan sistem optimasi *online* disebut reaktif karena optimasi dilakukan sebagai reaksi atas perubahan kondisi pemotongan yang dideteksi oleh sensor dan sistem kendali.

Metode penjadwalan laju pemakanan terdiri dari dua tahapan, pertama adalah menentukan laju pemakanan optimum berdasarkan kondisi acuan yang ditetapkan. Kondisi acuan yang ditetapkan bisa berdasarkan kondisi gaya potong (*cutting force*), volume material yang dipotong (*material removal rate*), tebal tatal (*chip thickness*), atau volume tatal (*chip volume*), dll. Tahap kedua adalah memodifikasi kode program NC untuk mengakomodasi nilai laju pemakanan yang baru.

Model penjadwalan laju pemakanan untuk proses pemesinan freis kompleks menjadi semakin populer dalam waktu ke waktu. Terdapat banyak penelitian yang dilakukan dengan berbagai pendekatan yang berbeda-beda. Dari berbagai pendekatan tersebut terdapat dua kategori yang paling banyak digunakan, yaitu a) model volumetris (*volumetric model*) atau disebut juga volume terpotong, dan b) model vektor gaya (*vector force model/mechanistic*). Laju pemakanan pada model volumetris disesuaikan secara proporsional baik berdasarkan volume material

yang dibuang maupun geometri tatal yang dihasilkan. Sedangkan model vektor gaya mengatur laju pemakanan dengan cara menjaga agar nilai gaya potong tetap optimum.



Gambar 7-3 Optimisasi Laju Pemakanan Menggunakan B-rep, a) Gerakan Awal dan Akhir Pahat, b) Volume Terpotong Per Blok, c) Permukaan Akhir, d) Volume Pahat Tersapu [20]

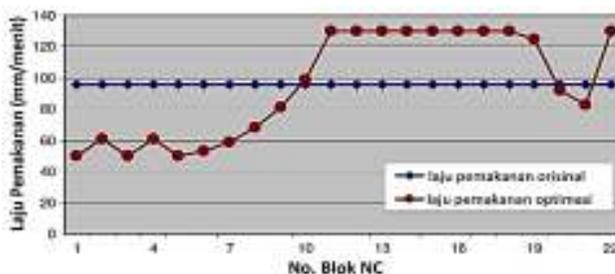
### 7.2.1. Strategi Optimasi Berbasis Volume Terpotong dan Geometri Tatal

Penerapan metode penjadwalan laju pemakanan pada pemesinan kompleks telah populer dan didukung oleh berbagai perangkat lunak CAD/CAM. Strategi tradisional yang digunakan dalam penjadwalan laju pemakanan adalah optimasi berbasis volume terpotong. Pada strategi ini, laju pemakanan diharapkan proporsional terhadap volume terpotong. Selain berdasarkan volume terpotong, optimasi laju pemakanan juga bisa menggunakan geometri tatal atau volume tatal. Metode ini banyak digunakan oleh peneliti terutama karena lebih mudah digunakan.

Hanya saja dengan berbagai penyederhanaan yang diterapkan pada metode ini, tingkat akurasi dan presisi hasil perhitungan lebih rendah dibanding metode vektor gaya.

### 7.2.1.1. Optimasi Laju Pemakanan Berdasarkan Volume Terpotong

Pada metode ini, laju pemakanan yang diprogram oleh operator CNC merupakan input yang digunakan sebagai referensi dalam proses optimasi. Dalam setiap interval pergerakan pahat maka volume terpotong dapat dihitung menggunakan model solid seperti B-Rep (BAB 3) maupun metode vektor diskrit (BAB 4). Ketika volume material terpotong diperoleh maka gaya potong dapat diestimasi pada setiap interval pergerakan pahat, atau disebut juga blok NC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7-3.

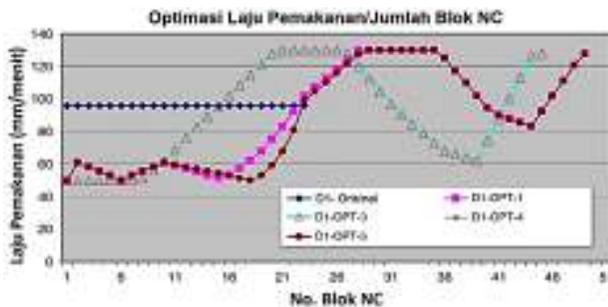


Gambar 7-4 Laju Pemakanan Orisinal dan Optimasi

Proses pemesinan pada Gambar 7-3 menggunakan laju pemakanan konstan dengan kecepatan 96 mm/menit pada program NC orisinal. Selanjutnya penjadwalan laju pemakanan dilakukan agar dihasilkan volume terpotong yang teratur dengan nilai sesuai acuan yang ditetapkan. Hasil dari optimasi laju pemakanan disajikan pada Gambar 7-4. Proses optimasi ini

diterapkan untuk pemesinan freis alur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7-3. Volume terpotong yang dihitung adalah volume di antara dua *CC-point*. Proses optimasi dilakukan tanpa menambah blok NC (baris program) baru. Laju pemakanan berdasarkan volume terpotong per blok NC dilakukan dan laju pemakanan baru ditambahkan pada setiap blok.

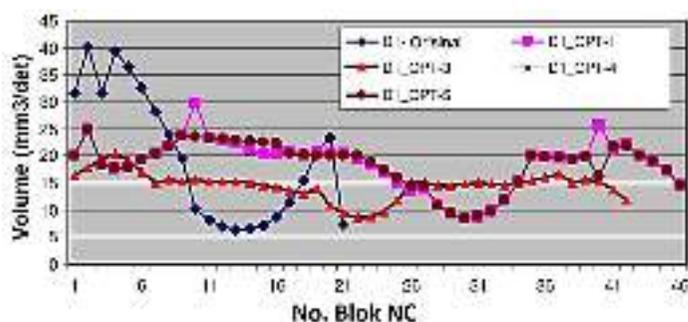
Metode optimasi lain juga bisa dilakukan dengan cara menambah blok NC baru seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7-5. Pada metode ini, penjadwalan laju pemakanan tahap awal dilakukan berdasarkan volume terpotong dan selanjutnya diubah dengan menambahkan laju pemakanan baru untuk setiap blok NC. Ketika laju pemakanan dan volume terpotong menunjukkan perubahan yang drastis maka ditambahkan blok NC baru di antara dua blok NC yang berurutan. Gambar 7-5 juga menunjukkan perubahan laju pemakanan dan jumlah blok NC dengan mempertahankan volume yang konstan untuk nilai volume acuan yang berbeda.



Gambar 7-5 Optimasi Laju Pemakanan dengan Berbagai Acuan Volume Terpotong

Kesimpulan yang bisa diambil dari hasil optimasi ini adalah, ketika volume terpotong meningkat maka laju pemakanan menurun, dan sebaliknya. Metode optimasi tanpa menambah blok

NC lebih sederhana pada pemesinan kasar dan waktu komputasinya juga lebih singkat. Pendekatan optimasi kedua dengan penambahan blok NC lebih sesuai untuk operasi semihalus. Agar nilai laju pemakanan optimal yang dihasilkan dari proses optimasi dapat digunakan pada proses produksi, maka perlu diketahui terlebih dahulu kemampuan mesin untuk meyakinkan bahwa nilai optimasi bisa diterapkan atau tidak.



Gambar 7-6 Perubahan Volume untuk Optimasi Lajur Pemakanan dengan Berbagai Volume Acuan

Gambar 7-6 menunjukkan volume terpotong yang telah diatur agar menghasilkan laju pemakanan yang optimal dengan berbagai standar volume acuan yang berbeda-beda. Dari proses optimasi ini dapat dilihat laju pemakanan tidak konstan. Laju pemakanan diatur sesuai dengan volume acuan yang ditetapkan. Dalam hal ini, volume terpotong diupayakan konstan pada setiap blok NC.

### 7.2.1.2. Optimasi Laju Pemakanan Berdasarkan Geometri Total

Metode lain yang dapat digunakan dalam proses optimasi proses pemesinan melalui metode penjadwalan laju pemakanan adalah metode optimasi berdasarkan geometri total. Metode ini digunakan

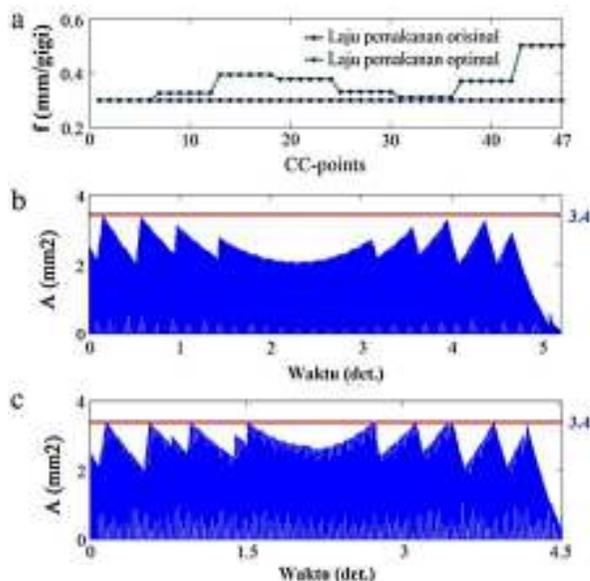
oleh Hendriko dkk[15] saat mengembangkan metode analitis untuk menghitung geometri tatal pada proses pemesinan semihalus (lihat BAB 5) Dalam metode ini, luas area tatal dalam satu blok NC terbesar digunakan sebagai acuan dalam menentukan laju pemakanan.

Pengujian dilakukan menggunakan Model Tes 2 seperti yang disajikan pada Gambar 5-10. Untuk menghindari terjadinya ketidakstabilan proses pemesinan yang disebabkan oleh perubahan laju pemakanan yang terlalu sering, maka optimasi lintasan pahat dilakukan untuk setiap enam *CC-point* dalam satu blok NC. Optimasi dilakukan berdasarkan luas tatal terbesar dalam satu blok NC merujuk pada data yang ditunjukkan Gambar 7-7. Dari data hasil perhitungan luas tatal diperoleh bahwa tatal pada *CC-point* 2 adalah yang terluas seperti yang terlihat pada Gambar 7-7b. Dengan demikian maka luas tatal ini digunakan sebagai acuan untuk blok NC lainnya. Selanjutnya laju pemakanan pada blok NC lainnya dioptimasi dengan cara membandingkan luas tatal yang dihasilkan terhadap luas tatal acuan.

Dari Gambar 7-7a dan Gambar 7-7b dapat disimpulkan bahwa laju pemakanan meningkat ketika luas area menurun, dan sebaliknya. Sehingga sebagian besar luas tatal yang dihasilkan dari proses optimasi menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan luas tatal orisinal. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7-7c. Selain itu, variasi luas tatal pada satu lintasan pahat juga menurun jika dibanding dengan luas tatal orisinal.

Proses optimasi yang dilakukan berhasil menurunkan waktu pemesinan dari 5,26 detik saat menggunakan laju pemakanan orisinal, berubah menjadi 4,55 detik setelah menerapkan penjadwalan laju pemakanan. Hal ini berarti proses optimasi mampu menurunkan waktu pemesinan sebanyak 13,7%. Namun hal sebaliknya bisa saja terjadi di mana penjadwalan laju

pemakanan menghasilkan waktu pemesinan yang lebih panjang ketika laju pemakanan awal sudah sangat tinggi.



Gambar 7-7 Optimasi Pemesinan pada Mesin Freis 5 Sumbu, a) Penjadwalan Laju Pemakanan, b) Luas Area Total dengan Laju Pemakanan Orisinal, c) Luas Area Total dengan Penjadwalan Laju Pemakanan.

### 7.2.2. Strategi Optimasi Berbasis Gaya Potong

Metode yang tepat dalam memprediksi gaya potong pada pemesinan freis sangat dibutuhkan dalam proses optimasi. Prediksi gaya potong dalam proses pemesinan menjadi sangat penting karena mempengaruhi akurasi hasil pemotongan, konsumsi daya, kemampuan mesin, maupun umur pahat potong. Dengan memprediksi gaya potong yang tepat maka kerusakan pahat dan hasil pemotongan yang tidak baik dapat dihindari.

Dari berbagai studi yang dilakukan, terdapat tiga metode prediksi gaya potong yang banyak digunakan, yaitu analitis, mekanistik, dan numerik [26]. Metode analitis memiliki kelemahan dalam hal akurasi, sedangkan metode numerik membutuhkan waktu perhitungan yang Panjang [27]. Model mekanistik terbukti mampu menutupi kelemahan kedua metode tersebut. Pada proses pemesinan freis, metode mekanistik merupakan yang paling banyak digunakan untuk memprediksi gaya potong yang timbul. Dengan metode ini, gaya potong setara dengan ukuran tatal dan koefisien gaya potong. Koefisien gaya potong merupakan koefisien spesifik untuk setiap pasangan benda kerja dan geometri pahat yang diperoleh melalui kalibrasi secara eksperimental.

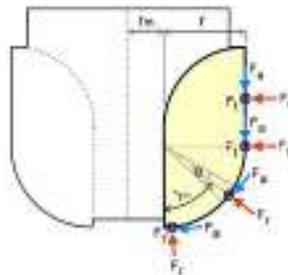
#### **7.2.2.1. Metode untuk Mengidentifikasi Koefisien Gaya Potong**

Koefisien gaya potong diidentifikasi melalui serangkaian pengambilan data dari hasil pemesinan. Terdapat dua jenis model mekanistik penghitungan gaya potong di literatur, yaitu model koefisien gaya eksponensial (*exponential force coefficient*) dan model gaya sisi linear (*linear edge force*). Gaya potong proporsional terhadap tebal tatal pada model koefisien gaya eksponensial. Dampak dari berbagai kondisi pada proses pemotongan digabung menjadi satu menjadi koefisien spesifik. Koefisien spesifik terdiri dari tiga komponen gaya, yaitu tangensial, radial dan aksial. Metode ini dikembangkan oleh Merchant [28]. Sementara itu Koenigsberger dan Sabberwal [29] melaporkan hubungan yang proporsional antara tebal tatal dan komponen gaya tangensial. Tlusty dan MacNeil [30] mengembangkan metode mekanistik dengan melibatkan komponen gaya radial. Metode ini telah banyak digunakan pada analisis gaya potong untuk berbagai kondisi pemesinan ([31][32]).

Metode gaya potong mekanistik dikembangkan dengan memperhatikan dua faktor fundamental. Faktor pertama adalah dampak pergeseran (*shearing effect*) yang terletak di zona pergeseran. Faktor berikutnya adalah efek tepi yang diinduksi akibat proses pembajakan yang dilakukan pahat pada daerah sisi yang tajam. Enam koefisien gaya potong perlu diidentifikasi melalui eksperimen dan analisis matematika. Koefisien hasil identifikasi tersebut hanya berlaku spesifik untuk kondisi pahat, benda kerja dan kondisi pemakanan yang digunakan. Jika variabel pemotongan yang digunakan berbeda maka perlu dicari lagi koefisien spesifik gaya potong.

Metode untuk mengidentifikasi koefisien gaya potong telah dijelaskan dengan lengkap oleh Altintas [33]. Gaya potong tangensial ( $F_t$ ), radial ( $F_r$ ), dan aksial ( $F_a$ ) yang terjadi pada setiap segmen sisi pahat potong dapat dihitung sebagai fungsi dari luas area dan panjang sisi kontak. Adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} F_{t,i,j}(\varphi, \phi) &= K_{tc} L_{i,j} h_{i,j}(\varphi) + K_{te} L_{i,j} \\ F_{r,i,j}(\varphi, \phi) &= K_{rc} L_{i,j} h_{i,j}(\varphi) + K_{re} L_{i,j} \\ F_{a,i,j}(\varphi, \phi) &= K_{ac} L_{i,j} h_{i,j}(\varphi) + K_{ae} L_{i,j} \end{aligned} \quad (7-1)$$



Gambar 7-8 Arah Komponen Gaya Potong Pada Sisi Pahat

Di mana  $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ , dan  $K_{ac}$  adalah koefisien gaya potong yang dihasilkan dari gaya geser pada arah tangensial, radial dan aksial. Sedangkan  $K_{te}$ ,  $K_{re}$ , dan  $K_{ae}$  adalah konstanta sisi (*edge constants*).  $L$  dan  $h$  adalah panjang tatal dan tebal tatal. Sedangkan subskrip  $i$  (1,2,3, ...) dan  $j$  (1,2,3, ...) menunjukkan urutan segmen sisi potong pahat dan gigi pahat. Sisi potong pahat disegmentasi menjadi ukuran kecil seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7-8. Tiga komponen gaya potong didistribusikan sepanjang sisi pahat yang bersinggungan dengan benda kerja. Untuk pahat toroidal, mekanisme diskritisasi sisi potong pada permukaan toroidal berbeda dengan permukaan silinder. Segmentasi pada permukaan toroidal diatur dengan membagi sudut toroidal antara UE-*point* ( $\lambda_n$ ) dan LE-*point* ( $\lambda_c$ ). Setiap segmen memiliki sudut segmen sebagai berikut,

$$\phi_j = \frac{\lambda_{n,j} - \lambda_{c,j}}{k} \quad (7-2)$$

di mana  $k$  adalah jumlah segmen. Gaya potong diasumsikan terletak pada bagian tengah segmen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7-8. Sudut toroidal sebuah segmen ( $\lambda_{i,j}$ ) adalah sudut yang diukur dari dasar pahat ( $\lambda = 0$ ) hingga ke bagian tengah segmen. Sudut toroidal dihitung menggunakan rumus berikut,

$$\lambda_{i,j} = \phi_j (i - 0.5) \quad (7-3)$$

Panjang setiap segmen dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$\begin{aligned} L_{i,j} &= \phi_j \pi r / 180 \text{ (sisi toroidal)} \\ L_{i,j} &= l_n / k \text{ (sisi silinder)} \end{aligned} \quad (7-4)$$

Setelah komponen gaya potong diperoleh, gaya pada koordinat kartesian dicari menggunakan transformasi koordinat dari pemotongan ortogonal (*orthogonal cutting*) menjadi

pemotongan miring (*oblique cutting*). Proses transformasi gaya potong dilakukan dengan memperhatikan pengaruh parameter sudut segmen ( $\lambda_{i,j}$ ), sudut persinggungan ( $\varphi$ ) dan sudut helix ( $\chi$ ), dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$[M]_F = Rot(Z, \varphi) \cdot Rot(Y, \chi) \cdot Rot(x, \lambda_i) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

Di mana

$$\begin{aligned} A_{11} &= \cos \varphi \cos \chi \\ A_{12} &= -\cos \varphi \sin \chi \sin \lambda_i + \sin \varphi \cos \lambda_i \\ A_{13} &= -\cos \varphi \sin \chi \cos \lambda_i + \sin \varphi \sin \lambda_i \\ A_{21} &= -\sin \varphi \cos \chi \\ A_{22} &= \sin \varphi \sin \chi \sin \lambda_i + \cos \varphi \cos \lambda_i \\ A_{23} &= \sin \varphi \sin \chi \cos \lambda_i + \cos \varphi \sin \lambda_i \\ A_{31} &= \sin \chi \\ A_{32} &= \cos \chi \sin \lambda_i \\ A_{33} &= \cos \chi \cos \lambda_i \end{aligned} \quad (7-6)$$

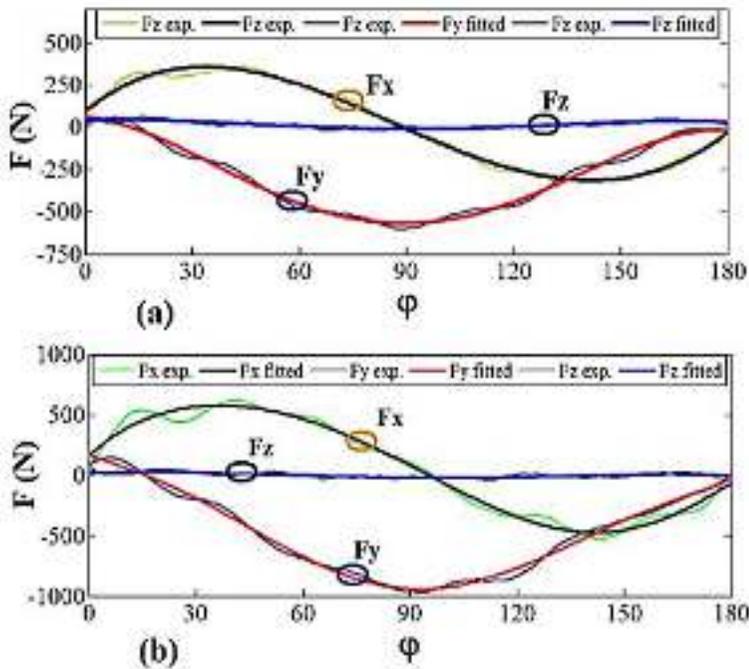
Ketika UE-point terletak pada permukaan silinder pahat,  $\lambda_i$  bernilai sama dengan  $\pi/2$ . Sehingga besar gaya potong untuk setiap sudut persinggungan pada pahat multi gigi dihitung dengan cara menjumlahkan seluruh gaya yang bekerja pada setiap gigi. Adapun rumus untuk menghitungnya adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k [M]_F \times \begin{bmatrix} F_{t,i,j}(\varphi, \phi) \\ F_{r,i,j}(\varphi, \phi) \\ F_{a,i,j}(\varphi, \phi) \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

Koefisien gaya potong dihitung secara empiris menggunakan data yang diperoleh dari hasil eksperimen. Martellotti [34] menjelaskan bahwa komponen gaya potong sangat

terkait dengan tebal tatal rata-rata. Sawin [35] dan Sabberwall [36] juga menunjukkan hasil yang sama di mana koefisien gaya potong berubah sejalan dengan perubahan tebal tatal. Selain dari itu, studi lain menunjukkan bahwa koefisien gaya potong juga tergantung kepada parameter pemotongan lainnya seperti kecepatan potong [37, [38] dan geometri pahat [39].

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k \left( L_{i,j} h_{i,j} [M]_F \begin{bmatrix} K_{tc} \\ K_{te} \\ K_{rc} \end{bmatrix} + L_{i,j} [M]_F \begin{bmatrix} K_{re} \\ K_{ac} \\ K_{ae} \end{bmatrix} \right) \quad (7-8)$$



Gambar 7-9 Contoh Data Polinomial, a) Laju Pemakanan 0,3 mm/Gigi dan Kedalaman Pemakanan 2 mm, b) Laju Pemakanan 0,1 mm dan Kedalaman Pemakanan 10 mm

Koefisien untuk setiap kedalaman pemakanan ditentukan menggunakan gaya potong rata-rata pada laju pemakanan yang berbeda namun kedalaman pemakanan yang konstan. Dengan menggunakan data gaya potong rata-rata dari dua laju pemakanan berbeda, maka enam koefisien potong dan koefisien sisi dapat ditentukan. Prosedur untuk memperoleh koefisien gaya potong untuk setiap perubahan kedalaman pemotongan mengikuti prosedur yang dilakukan oleh Ge dkk. [37].

Data gaya potong  $\{F_{s,1}, F_{s,2}, F_{s,3}, F_{s,4}, F_{s,5}, F_{s,6}\}$  diperoleh dari hasil pengukuran secara eksperimental dengan menggunakan enam variasi kedalaman pemotongan  $\{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6\}$ .  $F_s$  pada Persamaan (7-8) pada kedalaman pemakanan yang berbeda diubah menjadi  $\bar{F}_n = \bar{F}_{s,n} - \bar{F}_{s,n-1}$ , di mana  $n$  adalah kedalaman pemakanan saat ini dan  $n - 1$  adalah kedalaman pemakanan sebelumnya. Gaya potong untuk setiap rentang dihitung berdasarkan gaya potong pada dua lapisan yang berurutan. Untuk enam kedalaman pemakanan tatal aksial, gaya potong yang digunakan untuk beberapa kedalaman aksial adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{s,1} \\ \bar{F}_{s,2} - \bar{F}_{s,1} \\ \bar{F}_{s,3} - \bar{F}_{s,2} \\ \bar{F}_{s,4} - \bar{F}_{s,3} \\ \bar{F}_{s,5} - \bar{F}_{s,4} \\ \bar{F}_{s,6} - \bar{F}_{s,5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \\ \bar{F}_3 \\ \bar{F}_4 \\ \bar{F}_5 \\ \bar{F}_6 \end{bmatrix} \quad (7-9)$$

Akhirnya koefisien potong dan koefisien sisi terhadap kedalaman pemakanan aksial ( $D$ ) dihaluskan menggunakan polinomial. Persamaan polinomial kubik dirumuskan sebagai berikut,

$$K_q = aD^3 + bD^2 + cD + d \quad (7-10)$$

Di mana  $K_q$  ( $q = tc, rc, ac, te, re, ae$ ) adalah koefisien potong dan  $a, b, c, d$  adalah koefisien polinomial.

### 7.2.2.2. Implementasi Penghitungan Koefisien Gaya Potong

Serangkaian pengujian telah dilakukan dengan menggunakan *cutter* berbahan karbida dengan diameter 32 mm,  $11^\circ$  sudut *helical* dan 4 mm radius minor. Permesinan dilakukan pada mesin *milling* lima sumbu Tripteor X7 dan gaya potong diukur menggunakan dinamometer tiga komponen Kistler 9257B seperti yang terlihat pada Gambar 7-10. Parameter pemotongan yang digunakan adalah: kecepatan potong 1000 m/min dan kedalaman pemakanan adalah 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 mm, serta laju pemakanan 0,1; 0,2; 0,3 mm/gigi. Koefisien gaya potong diidentifikasi menggunakan laju pemakanan 0,1 dan 0,3 mm/gigi, sedangkan laju pemakanan 0,2 mm/gigi digunakan untuk verifikasi.



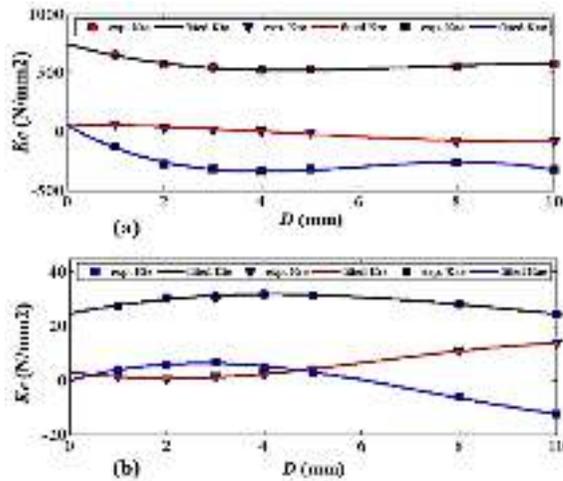
Gambar 7-10 Pengaturan Alat Pada Mesin 5 Sumbu

Melalui serangkaian proses eksperimen dan pemrosesan data, tren data koefisien potong dan koefisien sisi dapat ditentukan sebagaimana disajikan pada Gambar 7-11. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa nilai koefisien yang dihasilkan sangat fluktuatif. Oleh karena itu maka nilai yang diperoleh dari eksperimen dihaluskan sehingga nilainya pada setiap titik pada sisi pahat potong dapat

ditentukan. Dengan menggunakan polinomial kubik, koefisien potong dan koefisien sisi terhadap perubahan kedalaman pemakanan aksial ( $D$ ) diekspresikan sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 K_{tc} &= (-0.877) D^3 + (18.6863) D^2 + (-116.6406) D + 748.0811 \\
 K_{rc} &= (0.3048) D^3 + (-4.3090) D^2 + (-1.8247) D + 58.5752 \\
 K_{ac} &= (-2.4127) D^3 + (43.9065) D^2 + (-236.4195) D + 58.3667 \\
 K_{te} &= (0.0197) D^3 + (-0.5740) D^2 + (3.775) D + 24.5360 \\
 K_{re} &= (-0.0405) D^3 + (0.7798) D^2 + (-2.6908) D + 3.2515 \\
 K_{ae} &= (0.0522) D^3 + (-1.1549) D^2 + (5.1104) D + -0.057
 \end{aligned}
 \tag{7-11}$$

Dari grafik pada Gambar 7-11 dapat dilihat bahwa koefisien potong ( $K_{tc}$ ,  $K_{rc}$ ,  $K_{ac}$ ) memiliki fluktuasi yang lebih besar dibanding dengan koefisien sisi ( $K_{te}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{ae}$ ). Menurut Ge dkk. [37], fenomena ini dapat dijelaskan menggunakan mekanisme pemotongan baja. Perubahan drastis koefisien potong disebabkan oleh efek ukuran (*size effect*).



Gambar 7-11 Koefisien Data Hasil Eksperimen dan Data yang Telah Dihaluskan, a) Koefisien Potong, b) Koefisien Sisi

Data koefisien gaya potong yang diperoleh secara eksperimental hanya bisa diterapkan untuk pasangan benda kerja dan pahat yang spesifik digunakan saat pengambilan data. Artinya, ketika menggunakan pasangan benda kerja dan pahat yang berbeda maka koefisien gaya potong perlu diidentifikasi lagi. Koefisien gaya potong pada Persamaan (7-11) diperoleh dari data eksperimental menggunakan beberapa laju pemakanan dan kedalaman pemotongan. Sehingga rumus tersebut bisa digunakan untuk memprediksi gaya potong terhadap kedalaman pemakanan aksial dan laju pemakanan. Karena dampak dari kecepatan potong tidak dipertimbangkan dalam model yang dikembangkan, maka kemungkinan rumus ini tidak bisa digunakan untuk menentukan koefisien gaya potong dengan variasi kecepatan potong. Penelitian tentang hubungan kecepatan potong terhadap koefisien gaya potong telah dilakukan oleh Ge dkk. [37]. Mereka menyebutkan bahwa koefisien gaya potong cenderung membesar ketika kecepatan potong menurun, dan sebaliknya.

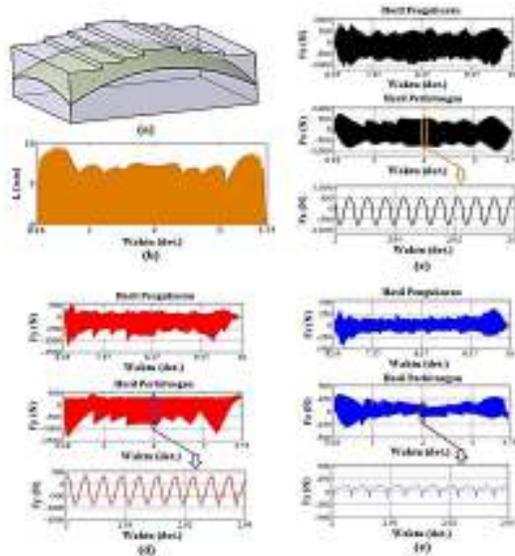
### **7.2.2.3. Prediksi Gaya Potong Pada Mesin Freis 5 Sumbu**

Prosedur untuk menentukan koefisien gaya potong yang dibahas pada subbab 7.2.2.1 merupakan metode yang diterapkan untuk operasi mesin freis tiga sumbu. Perhitungan untuk gaya potong pada mesin freis lima sumbu lebih rumit karena variasi orientasi sumbu pahat terhadap WCS. Pada mesin freis lima sumbu, secara umum gaya potong dapat ditentukan menggunakan dua cara, pertama adalah menggunakan dinamometer tipe meja yang dipasang pada meja rotasi mesin. Yang kedua adalah menggunakan dinamometer rotari yang langsung dipasang pada spindel, dan pahat potong dipasang pada dinamometer.

Berbeda dengan mesin freis tiga sumbu, orientasi pahat pada mesin 5 sumbu akan terus berubah. Oleh karena itu maka sistem koordinat pahat dikonversi ke sistem koordinat benda kerja. Sehingga persamaan untuk menghitung gaya potong pada arah X, Y, Z untuk mesin freis tiga sumbu di Persamaan (7-7) ditransformasikan ke mesin freis lima sumbu menggunakan persamaan berikut,

$$\begin{bmatrix} F_X(\varphi) \\ F_Y(\varphi) \\ F_Z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k [M] \times [M]_F \times \begin{bmatrix} F_{t,i,j}(\varphi, \phi) \\ F_{r,i,j}(\varphi, \phi) \\ F_{a,i,j}(\varphi, \phi) \end{bmatrix} \quad (7-12)$$

di mana  $[M]$  adalah operator untuk mentransformasi dari TCS ke WCS yang meliputi sudut orientasi pahat pada sumbu-x ( $\theta_A$ ) dan sumbu-y ( $\theta_B$ ).



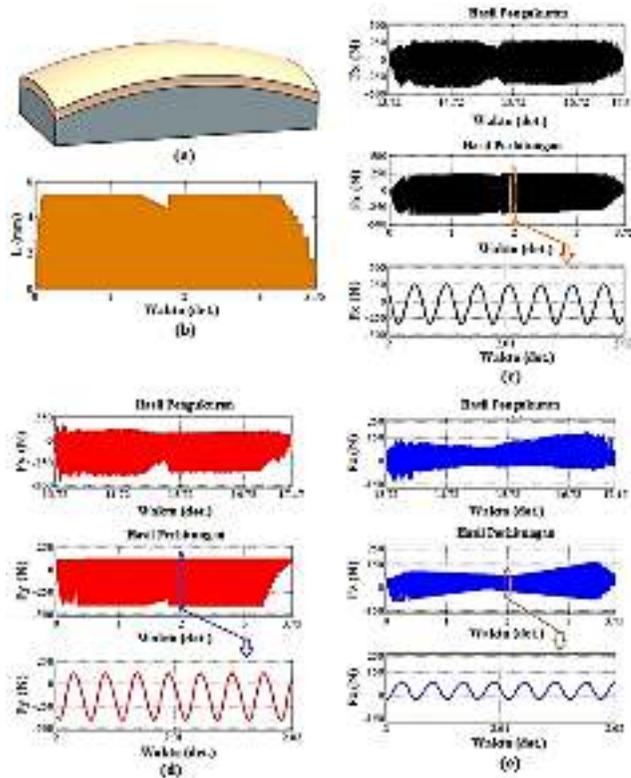
Gambar 7-12 Pengujian Gaya Potong Semihalus, a) Model Tes, b) Panjang Total, c) Gaya Potong Pada Sumbu-x ( $F_x$ ), d) Gaya Potong Pada Sumbu-y ( $F_y$ ), e) Gaya Potong Pada Sumbu-z ( $F_z$ )

Proses eksperimen untuk memverifikasi metode yang dikembangkan telah dilakukan pada mesin freis lima sumbu. Pengujian dilakukan menggunakan kecepatan potong 1000 m/min dan laju pemakanan 0,2 mm/gigi. Pengujian dilakukan pada operasi mesin freis semihalus dan halus. Untuk percobaan pertama, benda kerja dan produk yang akan dihasilkan menggunakan model tes yang disajikan pada Gambar 7-12a. Sedangkan panjang tatal dihitung menggunakan metode ABS untuk semihalus seperti yang diuraikan pada BAB 5 dan hasilnya disajikan pada Gambar 7-12b. Komponen gaya potong untuk satu lintasan pahat diukur dan dibandingkan dengan komponen gaya potong yang dihitung dengan metode yang dikembangkan.

Hasil pengukuran dan perhitungan disajikan pada Gambar 7-12c - Gambar 7-12e. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa grafik gaya potong hasil perhitungan yang disajikan menunjukkan profil yang hampir sama dengan profil grafik hasil pengukuran gaya potong. Untuk gaya potong pada sumbu-x ( $F_x$ ) dan sumbu-y ( $F_y$ ) hasilnya sangat mendekati, baik dari bentuk profil grafik maupun dalam hal besar gaya potong yang dihasilkan. Secara umum deviasi yang dihasilkan dari perhitungan gaya potong dibanding dengan hasil pengukuran kurang dari 15%. Sementara itu untuk arah sumbu-z ( $F_z$ ), deviasi yang dihasilkan lebih besar. Sebagian besar deviasi yang dihasilkan relatif rendah meskipun terdapat beberapa bagian yang perbedaannya hingga mencapai 40%.

Validasi kedua untuk model yang dikembangkan dilakukan pada permukaan berbentuk kompleks seperti yang ditampilkan pada Gambar 7-13a. Panjang tatal terhadap waktu dihitung menggunakan metode yang diuraikan pada BAB 5 dan hasilnya disajikan pada Gambar 7-13b. Gambar 7-13c - Gambar 7-13e menunjukkan data gaya potong terhadap waktu, baik yang diperoleh melalui perhitungan menggunakan metode yang dikembangkan maupun

melalui pengukuran secara eksperimental. Dari grafik yang ditampilkan dapat dilihat bahwa besar gaya potong yang dihasilkan dari perhitungan maupun pengukuran relatif sesuai. Secara umum deviasi yang dihasilkan relatif kecil yaitu kurang dari 10%. Sehingga hasil ini membuktikan bahwa metode yang dikembangkan mampu menghitung gaya potong dengan akurat.



Gambar 7-13 Pengujian Gaya Potong Permesinan Halus, a) Model Tes, b) Panjang Total, c) Gaya Potong Pada Sumbu-x ( $F_x$ ), d) Gaya Potong pada Sumbu-y ( $F_y$ ), e) Gaya Potong pada Sumbu-z ( $F_z$ )

#### 7.2.2.4. Optimasi Laju Pemakanan Berbasis Gaya Potong

Optimasi laju pemakanan berbasis gaya potong telah dilakukan oleh beberapa peneliti, salah satunya adalah Lee dan Chow [41]. Mereka melakukan verifikasi hasil perhitungan gaya potong pada proses pemesinan frais dengan pengukuran yang dilakukan menggunakan dinamometer. Perbandingan gaya potong hasil perhitungan menggunakan metode mekanistik dan gaya potong hasil pengukuran menggunakan dinamometer disajikan pada Gambar 7-14a. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa grafik hasil pengukuran dan perhitungan menunjukkan kecenderungan yang sama.

Berdasarkan hasil perhitungan gaya potong maka optimasi blok NC dapat dilakukan. Optimasi dilakukan melalui dua tahap, tahap pertama adalah dengan menambah program NC untuk bagian di mana terjadi perubahan gaya potong yang signifikan. Hal ini dilakukan agar tidak terjadi ketidakstabilan akibat perubahan laju pemakanan secara drastis dan mendadak. Tahap kedua adalah mengubah laju pemakanan agar gaya potong yang dihasilkan optimum dan bisa memperpendek waktu pemesinan. Beberapa baris program NC baik sebelum maupun sesudah dilakukan optimasi disajikan pada Gambar 7-14b. Dengan menerapkan penjadwalan laju pemakanan maka jumlah keseluruhan baris program bertambah dari 78 baris sebelum optimasi menjadi 377 baris setelah optimasi. Penjadwalan laju pemakanan memberikan dampak pada waktu pemesinan dari 240,1 detik sebelum optimasi menjadi 155,5 detik setelah optimasi. Terjadi efisiensi waktu sekitar 35%. Gambar 7-14c menyajikan perbandingan antara gaya potong maksimum sebelum dan sesudah penjadwalan laju pemakanan dilakukan. Dari grafik dapat dilihat bahwa gaya potong maksimum yang dihasilkan dari proses optimasi lebih seragam dibanding menggunakan laju pemakanan konstan sebelum optimasi dilakukan.

### 7.2.3. Perbandingan Metode Optimasi Berbasis Volume dan Berbasis Gaya Potong

Para operator pemesinan di industri tidak memiliki alat yang bisa digunakan untuk menghitung gaya potong yang muncul pada proses pemesinan kompleks. Sehingga tidak ada pilihan bagi mereka kecuali menentukan laju pemakanan secara tradisional. Cara tradisional yang dilakukan adalah dengan memilih satu nilai laju pemakanan yang tetap untuk keseluruhan operasi.

Optimasi laju pemakanan merupakan salah satu topik penting dalam industri yang melibatkan proses pemesinan di dalamnya. Sehingga memilih metode optimasi yang tepat menjadi hal yang penting. Sebelum menentukan metode yang tepat antara optimasi berbasis volume terpotong dan optimasi berbasis gaya potong, maka kriteria yang menjadi dasar pemilihan perlu ditentukan terlebih dahulu. Terdapat beberapa pertanyaan yang perlu dijawab, seperti jenis pemesinan apa yang akan dilaksanakan? Berapa toleransi yang diinginkan? Berapa waktu pemesinan yang diharapkan? dan parameter apa yang perlu ditingkatkan. Dari beberapa penelitian yang dilakukan terlihat bahwa optimasi berbasis volume terpotong tidak cukup mampu untuk menentukan nilai laju pemakanan secara akurat. Metode penjadwalan laju pemakanan yang digunakan pada hampir semua *software* CAD/CAM memiliki keterbatasan dalam mengatur laju pemakanan karena sistem yang dikembangkan berbasis volume terpotong [42-[43].

Nilai efektif laju pemakanan sepanjang operasi sulit diperoleh ketika gaya potong dianggap setara dengan volume terpotong. Nilai gaya potong berbeda mungkin saja diperoleh pada saat kondisi pemakanan berubah meskipun volume terpotong yang dihasilkan sama. Oleh karena itu maka strategi optimasi laju



proses pemakanan yang banyak dan laju pemakanan yang tinggi. Selain itu, perhitungan geometri tatal pada proses pemesinan kasar relatif lebih mudah. Sedangkan optimasi menggunakan gaya potong lebih sesuai digunakan pada proses pemesinan halus. Pada pemesinan halus tujuan utamanya adalah mendapatkan hasil permukaan yang halus dan akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vickers, G. W., & Quan, K. W. (1989). *Ball-mills versus end-mills for curved surface machining*.
- [2] Warkentin, A., Hoskins, P., Ismail, F., & Bedi, S. (2001). Computer-aided 5-axis machining. In *Systems techniques and computational methods* (pp. 3001-3034).
- [3] Baughman, J. A., & Leslie, W. H. P. (1970). *Multi-axis machining with APT*. Numerical control user's Handbook, McGraw-Hill, New York.
- [4] Held, M. (1991). *On the computational geometry of pocket machining* (Vol. 500). Springer Science & Business Media.
- [5] Bohez, E. L. (2002). Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(4), 505-520.
- [6] Zheng, G., Cheng, X., Li, L., Xu, R., & Tian, Y. (2019). Experimental investigation of cutting force, surface roughness and tool wear in high-speed dry milling of AISI 4340 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(1), 341-349.
- [7] Spence, A. D., & Altintas, Y. (1994). *A solid modeller based milling process simulation and planning system*.
- [8] Boz, Y., Erdim, H., & Lazoglu, I. (2015). A comparison of solid model and three-orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three-and five-axis virtual milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(5-8), 811-823.
- [9] Weinert, K., Du, S., Damm, P., & Stautner, M. (2004). Swept volume generation for the simulation of machining processes.

- International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 617-628.
- [10] Wang, W. P., & Wang, K. K. (1986). Geometric modeling for swept volume of moving solids. *IEEE Computer graphics and Applications*, 6(12), 8-17.
- [11] Imani, B.M., Sadeghi, M.H., Elbestawi, M.A. (1998). An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. *Int. J Mac. Tools Manuf.*, 38(9), 1089-1107
- [12] J. W. Park, Y. H. Shin, and Y. C. Chung, "Hybrid cutting simulation via discrete vector model," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 37, no. 4, pp. 419-430, 2005, doi: 10.1016/j.cad.2004.07.003.
- [13] Ozturk, B., Lazoglu, I. (2006). Machining of free-form surfaces. Part I: Analytical chip load. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(7-8), 728-735
- [14] Tunc, L.T., Budak, E. (2009). Extraction of 5 axis milling conditions from CAM data for process simulation. *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, 43, 538-550.
- [15] 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.
- [16] Gani EA, Kruth JP, Vanherck P, Lauwers B. A geometrical model of the cut in five axis milling for the influence of tool orientation. *Int J Adv Manuf Technol* 1997; 13: 677-84.
- [17] Altintas Y, Spence AD, Tlusty J. End milling force algorithms for CAD systems. *CIRP Ann – Manuf Technol* 1991; 40:31-4.
- [18] Mounayri, H. E., Spence, A. D., & Elbestawi, M. A. (1998). *Milling process simulation – a generic solid modeller based paradigm.*

- [19] Li, S. & Jerard, R.B. (1994). 5 axis machining of sculptured surfaces with a flat end cutter. *Computer Aided Design*, 26 (3), 165-178
- [20] Kurt, M., & Bagci, E. (2011). Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9-12), 1037-1067.
- [21] Nolzen, H., & Isermann, R. (1995, September). Fast adaptive cutting force control for milling operation. In Proceedings of International Conference on Control Applications (pp. 760-765). IEEE.
- [22] Pien, P. Y., & Tomizuka, M. (1992, June). Adaptive force control of two dimensional milling. In 1992 American Control Conference (pp. 399-403). IEEE.
- [23] Nouri, M., & Fussel, B. K. (2013). Real-time milling force control and tool wear monitoring using constraint-based feedrates. *Proceedings of NAMRI/SME*, 41(9).
- [24] Altintas Y. (2012). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*; 2nd ed. Cambridge, New York: Cambridge University Press;
- [25] Jerard RB, Fussell BK, Ercan MT. (2001). On-line optimization of cutting conditions for NC machining. NSF Design, Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida
- [26] Lee, H.U. & Cho, D.W. (2007). Development of a reference cutting force model for rough milling feed rate scheduling using FEM analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 47 (1), 158-167.

- [27] Ge, G., Baohai, W., Dinghua, Z., Ming, L. (2013). Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26 (3), 823-830.
- [28] Merchant, M. E. (1944). Basic mechanics of the metal-cutting process. *ASME J. of Applied Mechanics*, 11, A168.
- [29] Koenigsberger, F. & Sabberwal, A.J.P. (1961). An investigation into the cutting force pulsations during milling operations. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 1, 15-33.
- [30] Tlustý, J. & MacNeil, P. (1975). Dynamics of Cutting Forces in End Milling. *Annals of the CIRP*, 24, 21-25.
- [31] Altintas, Y., & Spence A.D. (1991). End Milling Force Algorithms for CAD Systems. *Manufacturing Technology CIRP Annuals*, 40, 31-34.
- [32] Sutherland, J.W. & DeVor, R.E. (1986). An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems. *Transactions ASME, Journal of Engineering for Industry*, 108, 269-279.
- [33] Altintas, Y. (2000). *Manufacturing Automation: Metal Cutting mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press
- [34] Martellotti, M. (1941). An analysis of the milling process. *Transactions of the ASME, J. of Engineering for Industry*, 63, 667-700.
- [35] Sawin, N. (1926). *Theory of milling cutters*. *Mechanical Engineering*, 48, 1203-1209.
- [36] Sabberwal, A. (1961). Chip section and cutting force during the milling operation, *CIRP Annals.*, 10, 197-203.

- [37] Ge, G., Baohai, W., Dinghua, Z., Ming, L. (2013). Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26 (3), 823-830.
- [38] Shin, Y.C., Waters, A.J. (1997). A new procedure to determine instantaneous cutting force coefficients for machining force prediction. *Int. J. Machine Tools and Manuf.*, 37 (9), 1337-1351.
- [39] Jayaram, S., Kapoor, S.G., DeVor, R.E. (2001). Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models. *Int. J Machine Tools and Manufacture*, 41, 265-281.
- [40] Hendriko, H., Kiswanto, G., Istiyanto, J., & Duc, E. (2018). Implementation of analytical boundary simulation method for cutting force prediction model in five-axis milling. *Machining Science and Technology*, 22(1), 163-179.
- [41] Lee, H. U., & Cho, D. W. (2003). An intelligent feedrate scheduling based on virtual machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11-12), 873-882.
- [42] Wang W.P. (1988) Solid modeling for optimizing metal removal of three-dimensional NC end milling. *Journal of Manufacturing Systems*, 7(1):57-65
- [43] Jang D.J., Kim K.S., Jung J.M. (2000). Voxel-based virtual multi-axis machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technollogy*, 16(10):709-713

## TENTANG PENULIS

**Dr. Hendriko, S.T., M.Eng.** lahir pada tanggal 9 Januari 1976 di Perdagangan, sebuah kota kecil yang terletak di Kabupaten Simalungun Sumatera Utara. Seluruh pendidikan dasar hingga pendidikan menengah diselesaikan di kota tersebut. Selepas lulus dari SMA Negeri 1 Perdagangan, Hendriko melanjutkan pendidikannya di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara pada tahun 1994. Pendidikan Sarjana Teknik diselesaikan pada bulan Januari tahun 2000. Tidak lama setelah tamat kuliah Hendriko langsung bergabung dengan Politeknik Caltex Riau sebagai dosen. Pada saat itu Politeknik Caltex Riau merupakan sebuah kampus yang sedang dipersiapkan oleh PT Caltex Pacific Indonesia dan Pemerintah Provinsi Riau untuk menjadi kampus unggulan di Provinsi Riau dan Indonesia.

Hendriko melanjutkan pendidikannya ke jenjang Magister pada program *Advanced Manufacturing Technology* di Universiti Teknologi Malaysia pada tahun 2007. Program S2 dapat diselesaikan dalam waktu dua semester di tahun 2008. Pada tahun 2010 Hendriko kembali melanjutkan pendidikannya ke jenjang Doktor dengan mengikuti program *Double Degree Indonesia Perancis (DDIP)*. Melalui program ini maka ia terdaftar di dua universitas sekaligus, yaitu Universitas Indonesia dan Universite Blaise Pascal di Perancis. Pendidikan juga dijalankan di dua kampus tersebut selama masing-masing 2 tahun. Pada tahun 2014 Hendriko berhasil menyelesaikan pendidikan S3 dan memperoleh ijazah dari kedua universitas tersebut.

Sebagai seorang dosen, Hendriko pernah mengajar beberapa mata kuliah seperti proses manufaktur, teknologi mekanik,

mekanika teknik, dan perpindahan panas. Ia juga dipercaya mengajar mata kuliah *research methodology* pada Program S2 Teknik Komputer Politeknik Caltex Riau. Selain mengajar, Hendriko juga banyak terlibat dalam berbagai kegiatan penelitian. Banyak program hibah penelitian yang diperoleh, khususnya program yang ditawarkan oleh Kemendikbud maupun Kemenristek RI. Dari hasil penelitian yang dilakukan banyak dihasilkan artikel ilmiah yang diterbitkan khususnya pada jurnal internasional bereputasi. Hasil lain yang diperoleh dari kegiatan penelitian adalah berupa paten yang tercatat di Kemenkumham RI.

Di luar kegiatan akademik, Hendriko juga berpengalaman dalam menjalankan peran manajerial. Tercatat ia pernah dipercaya menjadi Kepala laboratorium mesin produksi, Kepala UPT Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, dan beberapa posisi sebagai Wakil Direktur. Bahkan pada tahun 2014 Hendriko dipercaya oleh Yayasan Politeknik Chevron Riau sebagai Direktur Politeknik Caltex Riau. Tugas tersebut dijalankan selama dua periode dan selesai di tahun 2018.

Selain peran sebagai dosen di lingkungan internal Politeknik Caltex Riau, Hendriko saat ini juga tercatat sebagai asesor akreditasi di Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi (BAN-PT). Aktivitas lainnya adalah sebagai reviewer di berbagai jurnal nasional maupun internasional. Dengan kualitas publikasi yang dihasilkan, Hendriko banyak dipercaya untuk mereview dan memberi masukan terhadap artikel yang dikirim ke jurnal.

# Mesin Freis 5 Sumbu

## Pemodelan Geometri Tatal dan Optimasi Pemesinan



Mesin freis 5 sumbu hadir untuk menjawab permasalahan yang dihadapi mesin 3 sumbu dalam menghasilkan produk dengan bentuk yang kompleks. Tambahan dua sumbu pada mesin 5 sumbu menyebabkan pahat dapat diorientasikan ke berbagai arah. Dengan demikian, proses pemotongan dapat dilakukan dengan mudah meskipun bentuk produk yang dihasilkan sangat rumit. Namun, kemampuan pahat dalam melakukan gerakan yang fleksibel menyebabkan pemodelan proses pemotongan menjadi lebih rumit. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut dan dari penelitian tersebut dihasilkan beberapa metode dan strategi sebagai solusi.

Buku ini menyajikan gambaran lengkap tentang mesin freis 5 sumbu, termasuk sejarah munculnya mesin ini beserta perkembangan teknologi yang mendukungnya. Untuk memahami sistem pergerakan mesin freis 5 sumbu, berbagai tipe struktur mesin yang ada di pasaran serta cara menghitung kinematika pergerakannya turut dibahas. Buku ini juga menyajikan metode untuk menghitung geometri tatal (*chip geometry*). Terdapat tiga metode utama yang dibahas, yaitu solid model, metode vektor diskrit, dan metode analitis. Aplikasi ketiga metode tersebut dalam proses optimasi pemesinan disajikan dan diulas. Strategi optimasi waktu pemesinan yang digunakan adalah penjadwalan laju pemakanan (*federate scheduling*).



**Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)**  
Jl. Rajawali, Gang Elang 6 No.3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman  
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581  
Telp/Fax : (0274) 4533427  
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)  
cs@deepublish.co.id @penerbitbuku\_deepublish  
Penerbit Deepublish www.penerbitbukudeepublish.com

Kategori : Teknik Mesin

ISBN 978-623-02-2187-3



9 786230 221873