

Optimasi Jumlah *Cutter-Contact Point (cc-point)* pada Pembuatan Lintasan Pahat Proses Pemesinan *Milling Multi-Axis* Berbasis Model Faset 3D

Gandjar Kiswanto

Laboratorium Teknologi Manufaktur
Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia
Kampus Baru UI Depok 16424
E-mail : gandjar_kiswanto@eng.ui.ac.id

Abstrak

Proses pemesinan *milling* permukaan kontur (*sculptured surfaces*) banyak dilakukan untuk menghasilkan produk akhir, seperti untuk pembuatan : *dies/mold*, *propeller*, *impeller*, dan lain-lain. Pada pembuatan lintasan pahat proses pemesinan permukaan berkontur dengan menggunakan sistem-CAM berbasis model faset 3D yang dikembangkan *Laboratorium Teknologi Manufaktur, Departemen Teknik Mesin – Universitas Indonesia* diawali dengan penentuan rangkaian *cutter-contact point (cc-point)*. Namun pembuatan cc-point pada model faset 3D sangat bergantung dari toleransi triangulasi model faset tersebut bila penentuan cc-point dilakukan berdasarkan titik-potong antara bidang pembuat lintasan pahat dengan model faset. Hal ini menyebabkan semakin rendah (ketat) toleransi triangulasi pembuatan model faset, maka semakin banyak cc-point yang dihasilkan, begitu pula sebaliknya. Bila toleransi pemesinan lebih besar dari toleransi model faset (triangulasi) maka akan membuat proses komputasi semakin panjang melebihi kebutuhan yang seharusnya, dan pada akhirnya akan menghasilkan NC-blok yang juga melebihi kebutuhan. Pada makalah ini disampaikan hasil penelitian yang dilakukan untuk mengembangkan metode untuk mengoptimasi jumlah cc-point sehingga sesuai dengan toleransi pemesinan yang dispesifikasikan tanpa tergantung dari nilai toleransi model faset. Metode yang dikembangkan ini berhasil menghasilkan jumlah cc-point yang optimal, dengan membuang cc-point yang tidak diperlukan sehingga, sehingga sesuai dengan toleransi pemesinan yang dispesifikasikan.

Kata kunci: *cutter-contact point, optimasi, model faset 3D*

Pendahuluan

Model produk berkontur dan prismatic atau biasa disebut sebagai *prismatic and sculptured part model*, memungkinkan representasi produk yang memiliki bentuk estetik dan kompleks. Permukaan berkontur dan prismatic banyak digunakan pada produk rancangan industri dan komersial, seperti dibidang *aerospace*, otomotif, dan industri manufaktur *die* dan *mold*. Realisasi produk dengan permukaan kontur dengan proses pemesinan *milling* secara umum dapat dibagi dalam lima tahap: 1) Definisi fungsi dari produk (*conceptual design*), 2) Pemodelan geometri kedalam bentuk tiga dimensi, 3) Pembuatan *tool path*, 4) Verifikasi *tool path* and 5) Proses pemesinan *milling* pada mesin NC.

Dengan perkembangan teknologi manufaktur yang semakin pesat dan semakin tingginya kompetisi antara produsen produk-produk manufaktur, kebutuhan akan kualitas produk yang tinggi (*high quality product*) yang dihasilkan dengan kecepatan produksi yang tinggi (*high speed manufacturing*) dengan efisiensi biaya produksi yang tinggi (*low cost production*) menjadi suatu prasyarat. Kesemuanya itu membutuhkan sistem pendukung proses manufaktur yang handal. Salah satu pendukung tersebut adalah sistem-CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).

Oleh karena itu, proses manufaktur untuk menghasilkan produk sesuai dengan bentuk yang diinginkan tidak dapat hanya bergantung pada kesuksesan dalam pembuatan model geometri produk didalam sistem-CAD (*Computer-Aided Design*), tapi juga harus menghasilkan 'lintasan pahat' (*tool-path*) didalam sistem-CAM yang dapat menjamin proses pemesinan sehingga menghasilkan produk pada toleransi/akurasi yang dispesifikasikan.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan metode pembuatan lintasan pahat berbasis model faset 3D untuk proses pemesinan *milling multi-axis* yang, bila dibandingkan dengan pembuatan lintasan pahat konvensional berbasis model parametrik dan/atau *solid*, dapat

menghasilkan lintasan pahat yang cepat dan lebih handal yaitu yang bebas dari *gouging (overcut)* dan *collision* dan berada pada akurasi yang dispesifikasi. Model faset 3D sendiri adalah model produk yang direpresentasikan dengan serangkaian segitiga (*mesh of triangles*) dengan proses triangulasi terhadap model CAD tiga dimensi dari produk. *Gouging, overcut* atau *collision* adalah terjadinya interferensi antara *tools* (pahat potong) dengan produk yang dalam proses pemesinan atau antar komponen yang terlibat dalam proses pemesinan (a. l. pahat, produk, sistem clamping, dan bagian mesin lainnya) yang menyebabkan cacat produk hasil pemesinan.

Pada makalah ini dipresentasikan pengembangan lanjutan untuk mengoptimasikan jumlah titik-kontak pahat (*cc-point*) pada pembuatan lintasan pahat berbasis model faset 3D. Bagian 2 dari makalah ini menjelaskan metode yang digunakan untuk analisa kurvatur dari model faset 3D. Kemudian bagian 3 menampilkan hasil pengujian dari penerapan metode tersebut pada produk dengan permukaan kontur.

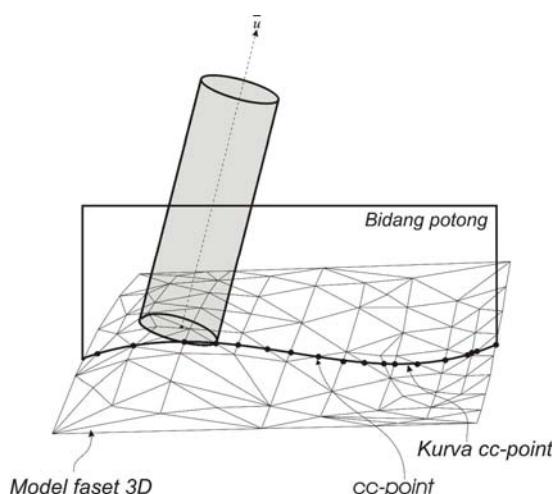
Pembuatan lintasan pahat pemesinan *Milling Multi-axis* berbasis model faset

Saat ini proses pemesinan *milling multi-axis* (5-axis) semakin banyak digunakan untuk pembuatan benda dengan bentuk yang kompleks seperti : *dies, moulds, turbine blades, marine propellers*, dan komponen pesawat/otomotif lainnya. Keutamaan *milling multi-axis* adalah pemakaian pahat yang optimal ditinjau dari bentuk produk dan proses set-up yang berkurang secara signifikan karena memungkinkan penetrasi pahat yang lebih baik ketimbang pemesinan 3-axis.

Pemesinan milling multi-axis sendiri dapat dilaksanakan dengan pembuatan lintasan pahat terlebih dahulu didalam sistem-CAM. Pembuatan lintasan pahat berbasis model faset 3D untuk pemesinan milling multi-axis yang dikembangkan Laboratorium Teknologi Manufaktur Departemen Teknik Mesin – Universitas Indonesia, dimulai dengan pembuatan rangkaian titik kontak pahat (*cutter contact points ~ cc-points*) yang merupakan rangkaian posisi terhadap model dalam proses pemesinan. Kemudian disetiap *cc-point* tersebut dilakukan pengaturan orientasi pahat yang optimum untuk menghindari interferensi dengan model produk.

Pembuatan cc-point

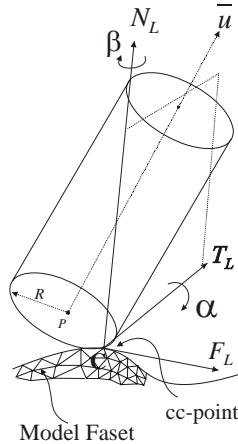
Cc-point dibuat dengan melakukan pemotongan (secara virtual) antara model faset dengan serangkaian bidang vertikal yang saling paralel (Gambar 1). Titik potong yang dihasilkan digunakan sebagai *cc-point* antara pahat dengan model faset. Untuk keperluan penghitungan dan pengaturan orientasi pahat, pada setiap *cc-point* terdapat sebuah Sistem Koordinat Lokal (*Local Coordinate System - LCS*) virtual.



Gambar 1: Pembuatan lintasan pahat

Seperti terlihat pada Gambar 2, sistem koordinat lokal direpresentasikan oleh sumbu \mathbf{F}_L , \mathbf{T}_L dan \mathbf{N}_L . Sumbu- \mathbf{N}_L adalah vektor normal lokal pada *cc-point* dan sumbu- \mathbf{F}_L adalah vektor arah pemotongan yang terletak pada bidang potong. Sumbu- \mathbf{T}_L adalah hasil *cross product* antara \mathbf{N}_L

dan \mathbf{F}_L ($\mathbf{T}_L = \mathbf{N}_L \times \mathbf{F}_L$). Sebuah bidang normal \mathbf{T}_L - \mathbf{N}_L adalah bidang yang melalui \mathbf{C} (*cc-point*) dan normal terhadap \mathbf{F}_L .

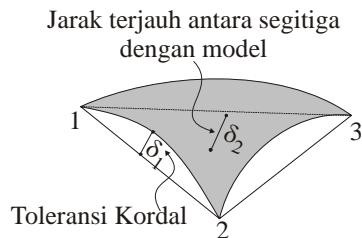


Gambar 2 : Sudut inklinasi (α) dan sudut screw (β) pada Sistem Koordinat Lokal

Pada model faset, vektor normal pada sebuah *cc-point* dihitung berdasarkan informasi vektor normal dari bidang segitiga. Orientasi pahat dapat dimodelkan oleh dua sudut : sudut inklinasi (*inclination angle*) (α) dan sudut *screw* (*screw angle*) (β). Sudut inklinasi didefinisikan sebagai perputaran pahat terhadap sumbu- \mathbf{T}_L , sedangkan sudut *screw* adalah perputaran pahat terhadap sumbu- \mathbf{N}_L .

Akurasi Model Faset

Berdasarkan sumber datanya, model faset dapat diperoleh dengan dua cara : 1) dibuat langsung dari *point-clouds* yang diperoleh dari proses rekayasa balik (*reverse engineering*), atau 2) pemfasetan (triangulasi) terhadap model parametrik/solid. Dalam kedua pendekatan tersebut, model faset yang dihasilkan harus sesuai dengan toleransi atau akurasi yang telah dispesifikasikan. Referensi yang umum digunakan untuk 'toleransi' tersebut (disebut toleransi triangulasi) adalah : 1) jarak terjauh dari permukaan model parametrik ke segitiga, atau 2) jarak dari permukaan model parametrik ke sisi segitiga atau biasa disebut sebagai toleransi kordal (*chordal tolerance*). Gambar 3 memperlihatkan referensi yang dapat digunakan sebagai toleransi triangulasi. Model faset dikatakan valid bila seluruh segitiga berada dalam toleransi triangulasi. Akurasi model-faset, yang dibuat berdasarkan toleransi triangulasi, nilainya adalah sama dengan toleransi triangulasi itu sendiri.

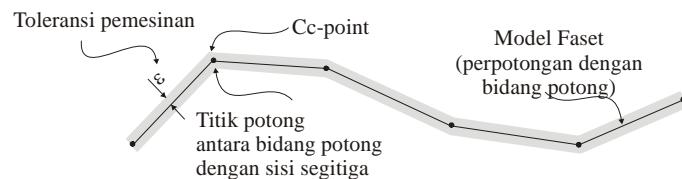


Gambar 3 : Referensi toleransi triangulasi yang mungkin

Toleransi Pemesinan

Pada pembuatan lintasan pahat berbasis model faset yang telah dilakukan selama ini, setiap *cc-point* yang didapat, melalui perpotongan antara bidang potong dengan model faset, merupakan *cc-point* aktual untuk mendapatkan posisi pahat atau biasa disebut sebagai *cutter-location*. Pergerakan pahat dari suatu *cc-point* ke *cc-point* berikutnya disebut sebagai *step-forward*. Jarak antara dua *cc-point* ini disebut sebagai *step-forward distance* (jarak *step-forward*).

Dengan mengambil seluruh cc-point dan diasumsikan tidak ada error interpolasi dan spasial dari mesin milling, maka seberapapun toleransi pemesinan yang diberikan akan selalu dapat terpenuhi. Hal ini dimungkinkan karena pahat 'berjalan' melakukan pemotongan tepat pada model faset-nya seperti terlihat pada gambar 4 berikut.

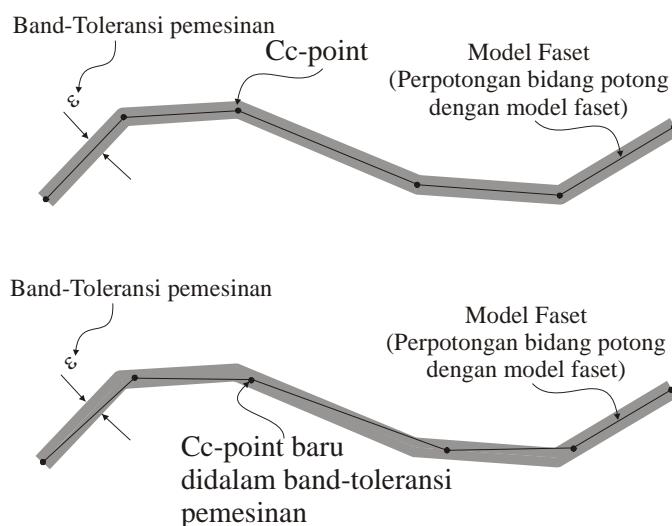


Gambar 4 : Lintasan pahat yang dibuat dari setiap cc-point yang didapat

Bila didapat 1000 cc-point dalam satu lintasan pahat maka keseluruhan cc-point tersebut akan menjadi referensi pembuatan posisi pahat. Konsekuensi yang didapat dengan metode pembuatan lintasan pahat tersebut adalah dihasilkannya jumlah cc-point yang melebihi kebutuhan, khususnya pada pemesinan dengan toleransi pemesinan yang besar namun dilakukan diatas model faset yang memiliki akurasi yang tinggi. Akibat langsung dari metode ini adalah jumlah NC-blok menjadi sangat besar walaupun toleransi pemesinannya tinggi sehingga pada akhirnya meningkatkan total waktu pemesinan.

Optimasi Jumlah Cc-point pada Pembuatan Lintasan Pahat

Untuk mengatasi hal tersebut diatas, maka dikembangkan suatu metode *filtering* terhadap data cc-point yang didapat. Metode ini memakai toleransi pemesinan (ϵ) sebagai penentu cc-point.

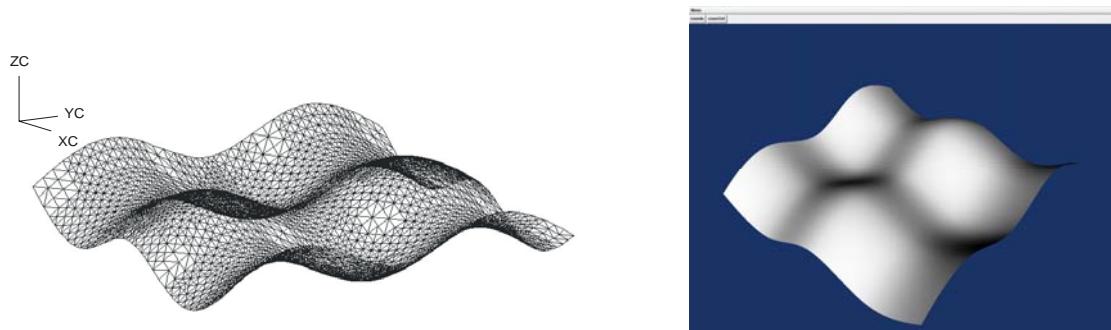


Gambar 5: Penentuan cc-point tanpa (atas) dan berdasarkan toleransi pemesinan (bawah)

Terlihat pada Gambar 5 (bagian bawah), cc-point dapat 'digeser sejauh-mungkin' kesuatu titik sehingga dimana garis yang menghubungkan dua-titik (cc-point) masih berada didalam batas (band) toleransi pemesinan sehingga didapat *step-forward maksimum*. Dengan semakin besarnya nilai toleransi pemesinan maka cc-point dapat menjadi lebih sedikit. Konsekuensi dengan metode ini adalah cc-point dapat berlokasi pada bidang segitiga yang tadinya hampir selalu berada pada titik (vertex) dan sisi segitiga.

Pengujian dan Hasil

Pada tahap awal dilakukan analisa pengaruh dari *band* toleransi pemesinan (*intol-outol*) dalam pembuatan rangkain *cc-point*. Pembuatan/penentuan *cc-point* dengan optimasi berbasis toleransi pemesinan dibandingkan dengan hasil pembuatan *cc-point* tanpa optimasi (tanpa optimasi berarti seluruh titik potong antara bidang potong dan model faset digunakan sebagai *cc-point*). Model faset A, seperti terlihat pada Gambar 6, yang memiliki akurasi sebesar $5\mu\text{m}$ (\sim dibuat dengan toleransi triangulasi $5\mu\text{m}$) digunakan sebagai model pengujian dengan 15 lintasan pahat.



Gambar 6 : Model faset A dibuat dengan akurasi $5\mu\text{m}$



Gambar 7 : Lintasan pahat yang dibuat diatas model faset A

Kemudian rangkaian *cc-point* yang diperoleh secara inisial dengan memotong bidang potong terhadap model faset, di filter dengan berbasis toleransi pemesinan yang telah dispesifikasikan untuk memperoleh *step-forward* maksimum yaitu : $1\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, and $15\mu\text{m}$. Hasil terlihat pada Tabel I dibawah ini.

Tabel I : Jumlah *cc-point* yang didapat dengan dua metode

No	Toleransi pemesinan ε (μm)	Jumlah <i>cc-point</i> yang dihasilkan	
		Tanpa optimasi	Dengan optimasi
1	1	6753	6681
2	5	6753	6132
3	15	6753	4876

Dari Tabel terlihat bahwa terdapat penurunan jumlah *cc-point* sejalan dengan semakin besarnya toleransi pemesinan. Pada toleransi pemesinan 1 μm terdapat pengurangan jumlah *cc-point* sebesar 1.06% , untuk toleransi pemesinan 5 μm sebesar 9.19% , and 15 μm sebesar 27.8%. Penurunan jumlah *cc-point* ini akan menghasilkan penurunan waktu pembuatan lintasan pahat terutama karena berkurangnya waktu pengecekan *gouging*/interferensi antara model pahat dan model faset.

Kesimpulan

CC-point didapat dengan melakukan pemotongan model faset dengan bidang potong. Metode yang dikembangkan untuk optimasi jumlah cc-point yang mempertimbangkan toleransi pemesinan menghasilkan *cc-point* lebih sedikit jumlahnya ketimbang tanpa mempertimbangkan toleransi pemesinan. Semakin besar toleransi pemesinan maka terdapat kecenderungan jumlah *cc-point* yang semakin sedikit. Hal ini disebabkan jarak step-forward dapat menjadi semakin jauh.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Negara Riset dan Teknologi (KNRT) yang telah membiaya sebagian dari penelitian ini melalui Riset Unggulan Terpadu XII 2005-2006.

Daftar Acuan

- [1]. Choi B.K., Chung Y. C., Park J. W., et. al., Unified CAM-system architecture for die and mould manufacturing, *Computer Aided Design*, vol. 26, no. 3, March 1994.
- [2]. Dejonghe P., An integrated approach for tool path planning and generation for multi-axis milling, ISBN 90-5682-315-9, PhD-thesis, K.U. Leuven, Leuven 2001.
- [3]. Kiswanto G., Tool path generation for multi-axis milling based on faceted models, ISBN : 90-5682-449-X, K. U. Leuven, Leuven 2003.
- [4]. Lauwers B., Kiswanto G., Kruth J. -P., Development of five-axis milling tool path generation algorithm based on faceted models, *Annals of the CIRP*, vol. 52, no. 1, pp. 85-88, 2003.
- [5]. Hwang J.S., Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces, *Computer Aided Design*, 1992, vol. 24, no. 12, pp. 675-676.
- [6]. Hwang J.S., Chang T.-C., Three-axis machining of compound surfaces using flat and filleted endmills, *Computer Aided Design*, 1998, vol. 30, no. 8, pp. 641-647.
- [7]. Jensen C.G., Mullins S.H., Anderson D.C., Scallop elimination based on precise 5-axis tool placement, orientation and step-over calculations, *ASME-Advances in Design Automation*, 1993, vol. 65-2, pp. 535-544.
- [8]. Kiswanto G., Kruth J.-P., Lauwers B., Tool path generation for 5-axis milling based on faceted models, *Journal of Engineering*, Vol.1., 2002.
- [9]. Kruth J.-P., Klewais P., Optimization and dynamic adaptation of the cutter inclination during 5-axis milling of sculptured surfaces, *Annals of CIRP*, 1994, vol. 43/1, pp. 443-448.
- [10]. Lai J.-Y., Wang D.-J., A strategy for finish cutting path generation of compound surfaces, *Computer in Industry*, 1994, no. 25, pp. 189-209.
- [11]. Li, F., Wang, X.C., Gosh, S. K., Kong, D.Z., Lai, T.Q., Wu, X. T., Gouge detection and tool position modification for five-axis NC machining of sculptured surface, *journal of materials processing technology*, 1995, v48 n1-4, pp. 739-745
- [12]. Li S.X., Jerard R.B., 5-axis machining of sculptured surfaces with flat-end cutter, *Computer Aided Design*, 1994, vol. 26, no. 3, pp. 165-178.
- [13]. Sprow E.E., Step up to 5-axis programming, *Manufacturing Engineering*, November 1993, pp. 55-60.
- [14]. Vickers G.W., Quan K. W., Ball-mills versus End-mills for Curved Surface Machining, *ASME Journal*, 1989, vol. 111, pp. 22-26.