

# Tool Path Planning Selection For 5-Axis Rough Machining Strategy Based On Faceted Models

Gandjar Kiswanto<sup>1,\*</sup>, Himawan Hadi Sutrisno<sup>2</sup> dan Jos Istiyanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia – Depok, Jawa Barat

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta – Jakarta

\*Corresponding author: gandjar\_kiswanto@eng.ui.ac.id

**Abstract.** The selection of the tool path planning is related with computation time used in tool path generation of machining process. On certain models, for example the model which has close bounded area (CBV area), offsetting curve surface to generating Cutter Contact point (CC point) on machining area which giving own difficulties. To shorten the steps and eliminate difficulties of CC point determination as well offsetting curve surface method, meshing strategy can be used for alternative tool path planning selection. By generating of STL file from CAD Model, determining CC point using meshing strategy can be done by steps as follow: 1. Triangulation of CAD model, 2. Determining the highest X, Y and Z value of model, 3. Determining the distance of point cloud at horizontal axis, 4. Determining the distance of point cloud at vertical axis. After generating mesh on machining area, the whole points used as CC point and for further proceeded as Cutter Location point (CL point) on post processing.

**Abstrak.** Pemilihan *tool path planning* berkaitan dengan waktu komputasi yang digunakan dalam membentuk *tool path generation* pada proses pemesinan. Pada model tertentu, sebagai contoh model yang memiliki area terbatas (*close bounded area*), metode offset kurva untuk membentuk CC point pada area pemesinan memberikan kesulitan tersendiri. Untuk mengurangi langkah dalam pembuatan CC point seperti halnya metode *offsetting* kurva permukaan pemesinan, strategi *meshing* dapat digunakan sebagai alternative pemilihan *tool path planning*. Diawali dengan pembuatan STL file dari model CAD, pembuatan CC point dengan strategi *meshing* dapat dilakukan dengan langkah sebagai berikut: 1. Triangulasi dari CAD model, 2. Menentukan nilai x, y dan z tertinggi dari model, 3. Menentukan jarak antar point cloud pada sumbu horizontal, 4. Menentukan jarak antar point cloud pada sumbu vertical. Setelah *meshing* dapat dibentuk pada area pemesinan, seluruh titik yang terbentuk digunakan sebagai CC point dan selanjutnya diolah menjadi CL point (CL point) pada *post processing*.

**Keywords:** tool path planning, CC point, CL point, *CBV area*

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Secara umum, proses pemesinan dibagi menjadi 2 bagian yaitu: proses pemesinan awal dan proses pemesinan akhir. Dimana proses pemesinan awal memiliki tujuan membentuk benda mendekati bentuk asli dengan waktu yang secepat cepatnya, sedangkan proses pemesinan akhir, bertujuan membentuk benda sesuai dengan yang diinginkan dan memenuhi toleransi yang ditentukan.

Salah satu langkah dalam proses pemesinan adalah membuat *CL point* pada area pemesinan. Pada proses ini, kunci keberhasilan ditentukan oleh efektifitas *tool path planning* yang diterapkan pada permukaan benda kerja. Beberapa peneliti mengembangkan *tool path planning* berbasis model parametric [1, 2]. Model ini, banyak dikembangkan karena model parametric mudah dianalisa secara matematik. Beberapa peneliti yang mengembangkan model parametric untuk meningkatkan kapabilitas *tool path planning*, diantaranya: Hauth et. al [3] Dalam penelitiannya

*tool path planning* dengan *cusp heigh* yang seragam meningkatkan keefektifan lintasan pahat, namun implementasi pada permukaan kompleks sulit dicapai, karena kurvatur permukaan sangat beragam. Ding et al. [4] menerapkan algoritma dengan mengadaptasikan *iso planar* untuk mengurangi panjang lintasan pada permukaan kompleks. Namun perhitungan matematiknya memerlukan langkah yang panjang.

Pada proses pemesinan awal, CC point tidak hanya dibentuk pada permukaan benda kerja. Melainkan dibentuk pada seluruh area pemesinan. Yang memungkinkan posisi CC point tidak berdekatan dengan kurvatur model. Bagian ini, memberi tantangan tersendiri ketika basis data yang digunakan berupa model facet.

Dalam pengembangan *tool path planning* berbasis model facet, optimasi dapat dilakukan dengan menyederhanakan komputasi dalam pembuatan CC point[5]. Sun et al. [3] dengan menyederhanakan komputasi antara perpotongan

segitiga dengan *slicing plane*, interpolasi kurva hasil perpotongan antara *slicing plane* terhadap model facet dapat dioptimalkan. Namun demikian, posisi *slicing plane* (sejajar dengan bidang *xy* atau *zy*) memberikan perbedaan yang signifikan terhadap panjang *tool path* yang dibentuk.

Dari CC point yang dibentuk pada kurvatur permukaan model, langkah berikutnya adalah menentukan CC point pada seluruh area pemesinan. Terutama hal ini digunakan untuk proses pemesinan awal yang membentuk model mendekati bentuk asli.

Salah satu cara yang digunakan untuk menentukan CC point pada area pemesinan adalah menggunakan *offsetting* dari kurva yang dibentuk oleh perpotongan model faset terhadap *slicing plan*. Metode ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi terhadap bentuk permukaan yang akan dilakukan proses pemesinan, meskipun tergantung pada toleransi dari model faset. Namun demikian, pada area pemesinan yang memiliki bentuk kurva yang extreme (misal: memiliki *feature close bounded volume*) metode *offset* kurva ini sangat sulit diterapkan dan memerlukan metode komputasi yang lain.

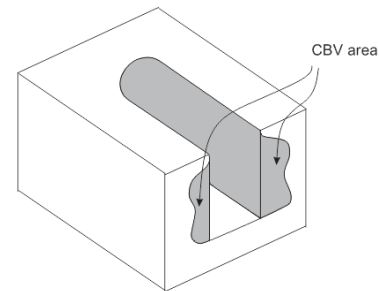
Untuk mengurangi langkah dalam menentukan CC point pada *tool path planning* berbasis model facet, pembuatan point cloud pada seluruh volume benda kerja dapat digunakan sebagai alternative untuk menentukan CC point pada bentuk-bentuk yang memiliki kompleksitas kurvatur permukaan yang tinggi, sehingga tidak mempergunakan model komputasi lanjutan.

### Tool Path Planning Untuk Mesin Milling 5-Axis

Model faset disebut juga *triangular mesh*, *polyhedral models*, serta *tessellated models* merupakan basis data yang banyak dikembangkan oleh peneliti dewasa ini. Model ini memiliki keunggulan dalam pengolahan data dan komputasi [6-22]. Sehingga beberapa system CAD/CAM menggunakan model ini dalam proses pemesinan dengan output berupa *STL file*. Namun demikian, model faset ini juga memiliki kelemahan yaitu jumlah segitiga mempengaruhi akurasi model yang dibentuk. Hal ini disebabkan semakin tinggi akurasi yang diharapkan maka jumlah segitiga yang dibentuk semakin besar, sehingga waktu komputasi menjadi semakin panjang.

Seiring dengan perkembangan kemampuan mesin milling, dari 3-axis hingga menjadi 5-axis, kompleksitas permukaan model juga semakin berkembang. Permukaan yang memiliki lebih dari satu prismatic lazim digunakan sebagai basis penelitian. Permukaan yang memiliki feature lebih dari satu prismatic disebut sebagai permukaan

komplek. Salah satu diantaranya adalah area Close Bounded Volume (area CBV). Feature ini dapat dijelaskan seperti gambar 1 dibawah ini.

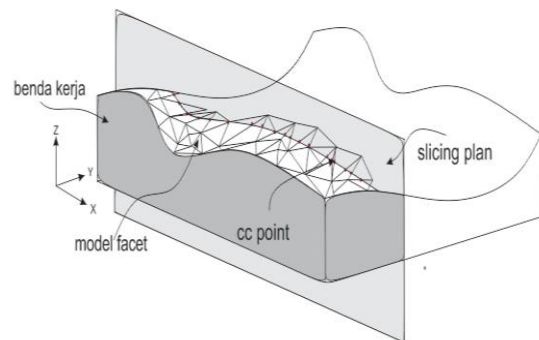


Gambar 1. feature area CBV pada permukaan kompleks

Pada contoh model diatas, metode *offset* kurva dari perpotongan *slicing plane* terhadap segitiga memerlukan komputasi yang kompleks. Hal ini dapat dijelaskan pada sub bab dibawah ini.

### Tool path planning menggunakan offset kurva pada permukaan benda kerja

Dari STL file yang dihasilkan oleh CAD model, menentukan CC point dengan menggunakan *slicing plane*, mendapatkan perpotongan antara bidang (*slicing plane*) terhadap segitiga. Jarak antar CC point yang dibentuk tergantung dari kerapatan segitiga yang membentuk model. Semakin kompleks bentuk permukaan model maka CC point menjadi semakin banyak. Cara menentukan CC point dengan metode ini dapat dijelaskan seperti gambar 2 dibawah.



Gambar 2. Metode *slicing plane* untuk membentuk CC point pada area pemesinan

CAD model dengan basis data berupa model faset, terdiri dari segitiga yang saling terhubung. Sedangkan *Slicing plane*, merupakan proyeksi dari bidang 2 dimensi dari model sebagai bidang virtual. Dimana bidang yang dibentuk dapat sejajar dengan bidang *xz*, bidang *xy* ataupun bidang *yz*. Titik potong antara *slicing plane* (bidang *xz*) seperti

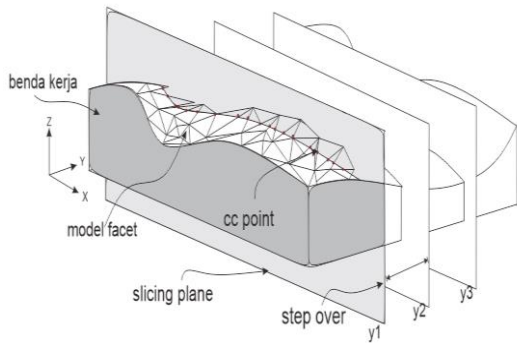
gambar 2. menggunakan rumus sebagai berikut[23]:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}$$

$$x = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} (x_2 - x_1) + x_1$$

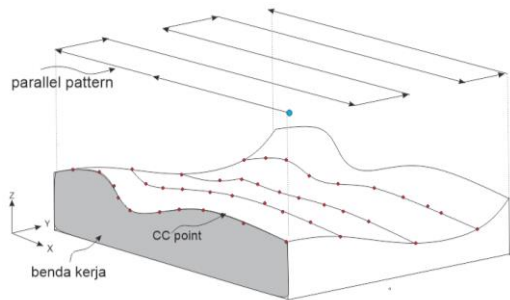
$$z = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} (z_2 - z_1) + z_1 \dots \dots \dots (1)$$

Dari rumus diatas, nilai *x* dan nilai *z* hasil perpotongan antara bidang terhadap segitiga dapat diketahui. Sedangkan posisi titik *y* konstan sesuai dengan posisi *slicing plane*. Sehingga posisi CC point (*x, y, z*) dapat terpenuhi. Jarak antar *slicing plane* (*y2-y1*) dapat digunakan sebagai jarak antar lintasan pahat atau disebut sebagai *step over*, hal ini dapat dijelaskan seperti gambar 3 dibawah.



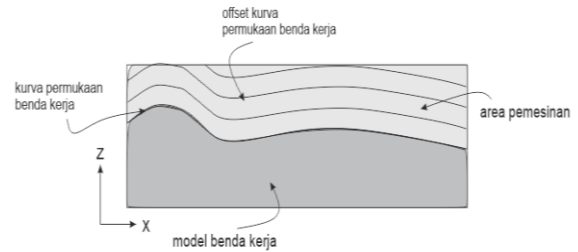
Gambar 3. Jarak antar *slicing plane*

Dari setiap CC point yang terbentuk pada permukaan benda kerja, pemilihan pattern dapat dilakukan sebagai strategi proses pemesinan. Sebagai contoh: dengan memilih pattern parallel seperti pada gambar 4 dibawah, arah lintasan pahat ditentukan sebagai arah pemakanan, *step over* diperoleh dari jarak antar lintasan terhadap bidang *y*. sedangkan *dept of cut* diperoleh dengan parallel offset dari kurvatur permukaan benda kerja

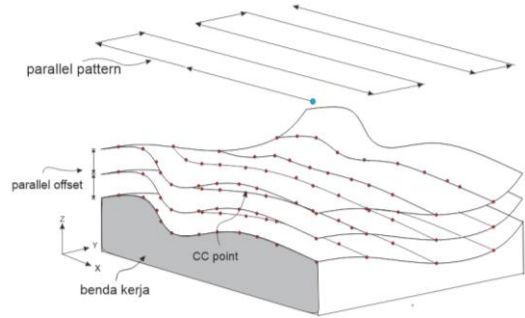


Gambar 4. CC point pada permukaan benda kerja

Pada gambar diatas, CC point merupakan bagian titik dari kurvatur permukaan benda kerja. Sedangkan untuk memperoleh CC point diluar kurvatur dari permukaan benda kerja (berada pada area pemesinan), dapat dilakukan dengan *offset* dari kurva terhadap sumbu *z* diilustrasikan seperti gambar 5. dibawah ini.



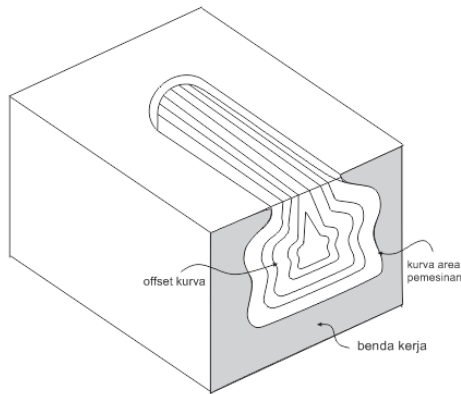
(a)



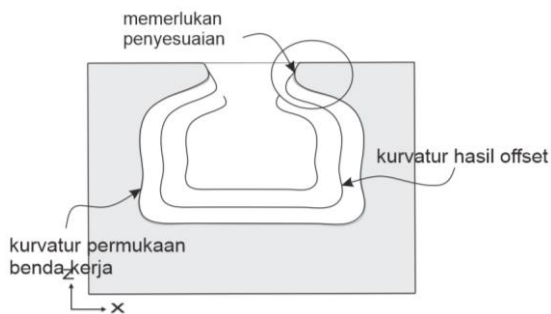
(b)

Gambar 5a. *Offset* kurva untuk menentukan CC point pada area pemesinan, 5b. *parallel offset* CC point dari kurva permukaan pada area pemesinan

Dengan menggunakan metode *offset* kurva seperti penjelasan diatas[24], untuk model tertentu (permukaan yang memiliki feature CBV) metode *offset* kurva mengharuskan menambahkan metode komputasi untuk menyesuaikan hasil *offset* sehingga menghasilkan CC point pada area pemesinan. Karena *offset* dari kurvatur permukaan benda kerja tidak serta merta dapat dibentuk pada bagian-bagian tertentu. Hal ini dapat diilustrasikan seperti pada gambar 6 dibawah.



(a)



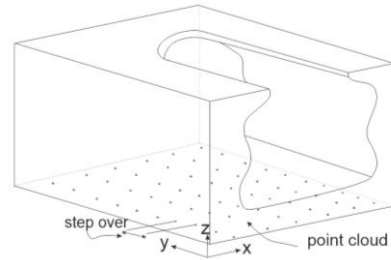
(b)

Gambar 6a. Ilustrasi metode *offset* untuk permukaan yang memiliki *feature* area CBV, 6b. penyesuaian (komputasi) kurvatur hasil *offset*

Dari hasil *slicing plane*, kervatur permukaan benda kerja sebagai basis perhitungan *offset* tidak dapat langsung digunakan. Hasil *offset* memerlukan komputasi lanjut agar dapat dimanfaatkan sebagai CC point pada area pemesinan.

### Tool path planning menggunakan point cloud

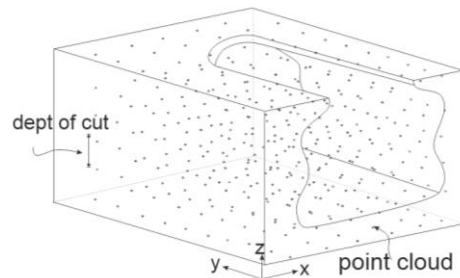
Point cloud, merupakan salah satu cara membentuk titik-titik pada ruang 3 dimensi yang dapat digunakan sebagai CC point pada area pemesinan. Metode ini, memerlukan informasi berupa jarak antar point cloud pada sumbu vertikal maupun sumbu horizontal [25-27]. Untuk menyesuaikan dengan parameter yang digunakan pada proses pemesina, jarak antar point cloud pada sumbu horizontal disesuaikan dengan diameter pahat. Dimana jarak antar point cloud pada sumbu horizontal dapat dimanfaatkan sebagai *step over* (sesuai dengan arah pemakanan dari pahat) seperti yang terlihat pada gambar 7. Sedangkan jarak antar point cloud pada sumbu vertical disesuaikan dengan kemampuan pahat sebagai *dept of cut* (lihat gambar 8).



Gambar 7. Pembuatan point cloud dengan jarak antar point cloud sebagai *step over* pada lintasan pahat

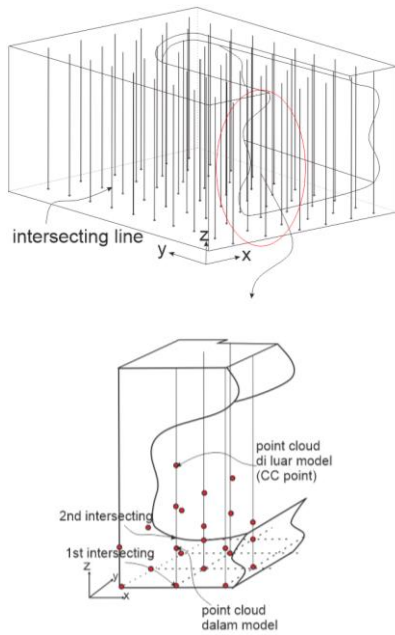
Langkah tool path planning menggunakan metode meshing adalah sebagai berikut:

1. Pembacaan STL file untuk triangulasi dari model CAD
2. Menentukan titik tertinggi dari model, pada sumbu x, sumbu y, sumbu z
3. Menentukan diameter dan material pahat yang digunakan
4. Menentukan jarak antar point cloud pada sumbu horizontal dan sumbu vertical
5. Membentuk point cloud pada seluruh area pemesinan seperti pada gambar 8 dibawah.



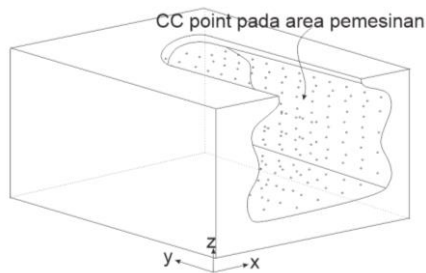
Gambar 8. Jarak antar point cloud sumbu vertikal dapat digunakan sebagai *dept of cut*

Untuk memisahkan point cloud yang berada pada model benda kerja dan point cloud pada area pemesinan (CC point), dapat menggunakan metode *intersecting line*. *Intersecting line* merupakan garis bantu untuk mengevaluasi posisi point cloud. Seperti pada gambar 9, point cloud yang berada diantara 2 perpotongan segitiga dan *intersecting line*, merupakan point cloud yang berada dalam model benda kerja. Sedangkan point cloud yang berada diluar 2 perpotongan *intersecting line* dan segitiga merupakan point cloud yang digunakan sebagai CC point.



Gambar 9. *Intersecting line* untuk evaluasi area pemesinan

Dari evaluasi menggunakan *intersecting line*, point cloud yang berada di dalam model diabaikan. Sedangkan point cloud yang berada diluar model digunakan sebagai CC point untuk area pemesinan yang berikutnya digunakan sebagai basis perhitungan orientasi pahat. CC point pada area pemesinan hasil evaluasi *intersecting line* dapat dilihat seperti gambar 10.



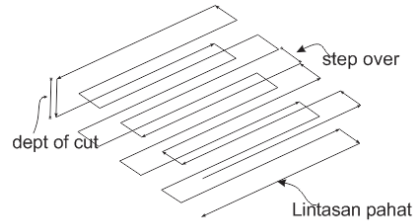
Gambar 10. Point cloud sebagai CC point pada area pemesinan

Setelah CC point dapat diidentifikasi pada seluruh area pemesinan. Operator dapat memilih pattern sebagai strategi pada tool path planning. Terdapat 3 *pattern* yang umum digunakan pada proses pemesinan yaitu:

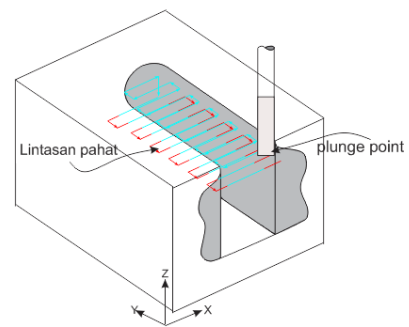
1. *Pattern* parallel zig
2. *Pattern* zig-zag
3. *Pattern* spiral

Lintasan pahat dibentuk dengan menghubungkan antar CC point searah dengan arah pemakanan (lihat gambar 10), titik masuk pahat

sebagai *tool entry point* pada umumnya dipilih pada CC point tertinggi pad area pemesinan. Titik ini juga dikenal sebagai *plunge point*. Gambar 11. dibawah merupakan ilustrasi *tool entry point* setelah pattern ditentukan.



Gambar 10. Pembuatan lintasan pahat



Gambar 7. Plunge point pada lintasan pahat

## Hasil dan Pembahasan

Dari penjelasan diatas, perbedaan langkah untuk *tool path planning* dengan metode *offset* kurva dibandingkan dengan metode pembuatan point cloud dapat dijelaskan seperti table 1 dibawah ini

Table 1 perbedaan path planning menggunakan strategy offset krva permukaan pemesinan dan pembuatan point cloud

N	Langkah pembuatan tool path planning	Offset kurva permukaan pemesinan	Pembuatan point cloud
1	STL reader	√	√
2	Membentuk bidang potong	√	-
3	Perhitungan perpotongan segitiga terhadap bidang potong	√	√
4	Membentuk point cloud pada seluruh volume benda	-	√
5	Menentukan titik potong sebagai CC point pada	√	-

	permukaan benda kerja			
6	Membentuk kurva lintasan pahat	√	-	
7	Offset kurva lintasan pahat	√	-	
8	Menyesuaikan bentuk kurva hasil offset terhadap seluruh area pemesinan	√	-	
9	Menentukan <i>step over</i> dan <i>dept of cut</i>	√	√	
10	Menentukan plunge point	√	√	
11	Memeilih <i>cut pattern</i>	√	√	
12	<i>Tool path generation</i>	√	√	

Dari table diatas, strategi meshing untuk membentuk cc point pada tool path planning memberi keuntungan diantarananya: CC point pada area pemesinan yang berada diluar kurva dapat ditentukan dengan mudah. Jarak antar lintasan dan besaran *dept of cut* dapat disesuaikan dengan diameter dan material pahat yang digunakan.

## Kesimpulan

Untuk bentuk kompleks dengan kompleksitas permukaan yang extreme, pembutan point cloud pada area pemesinan memberi kemudahan dalam membentuk CC point dibandingkan dengan metode *offset* kurva dari kurvatur permukaan benda kerja. Namun demikian, CC point yang dibentuk berdasarkan slicing plane memberikan keakurasian terhadap kurvatur dari permukaan model (*curve match machining*). Sedangkan dengan pembuatan point cloud, CC point tidak dapat menyesuaikan kurvatur dari permukaan benda kerja namun tidak memerlukan komputasi lanjutan dalam menentukan CC point pada area pemesinan.

Dari penjelasan diatas, tool path planning dengan metode offset kurvatur dari permukaan model lebih cocok jika digunakan untuk proses pemesinan akhir (*finishing*) sedangkan pembuatan point cloud sebagai CC point pada area pemesinan lebih cocok digunakan untuk proses pemesinan awal (*roughing*)

## Referensi

- [1] J.-w. Ma, D.-n. Song, Z.-y. Jia, G.-q. Hu, W.-w. Su, and L.-k. Si, "Tool-path planning with constraint of cutting force fluctuation for curved surface machining," *Precision Engineering*, vol. 51, pp. 614-624, 2018.
- [2] L. Hu, Y. Liu, C. Peng, W. Tang, R. Tang, and A. Tiwari, "Minimising the energy consumption of tool change and tool path of machining by sequencing the features," *Energy*, vol. 147, pp. 390-402, 2018.
- [3] S. Hauth, C. Richterich, L. Glasmacher, and L. Linsen, "Constant cusp toolpath generation in configuration space based on offset curves," *Int. J Adv Manuf Technol*, vol. 53, p. 14, 2011.
- [4] S. Ding, M. MA, A. Poo, D. Yang, and Z. Han, "Geometric simulation of NC Machining Based on STL Models," *Computer Aided Design*, vol. 35, 2003.
- [5] S. C. Park, "Sculptured surface machining using triangular mesh slicing," *Computer-Aided Design*, vol. 36, 2004.
- [6] G. Kiswanto, "The Development Of Advanced CAM-System," *Seminar Nasional Viable Manufacturing Sistem*, 2004.
- [7] G. Kiswanto and Cristiand, "The development of Spline Generator Algorithm Based On CL-Curve For 5-Axis Spline Machining," *The 9th International Conference on Quality in Research*, 6 September 2006.
- [8] G. Kiswanto and H. Budiman, "Development of Analytic Solution of Inverse Kinematic and Motion Simulation for 5-DOF Milling Robot," *The 10th International Confernce on Quality in Research*, 2007.
- [9] G. Kiswanto, B. Lauwers, and J.-P. Kruth, "Gouging elimination through tool lifting in tool path generation for five-axis milling based on faceted models," *Int. J Adv Manuf Technol*, vol. 32, p. 21, 2007.
- [10] G. Kiswanto and A. Sambodo, "Development of Multi-Axis Force Detector for 5-DOF Articulated Robot," *The 10th International Confernce on Quality in Research*, 2007.
- [11] G. Kiswanto, "Analisa Geometri Antar Muka Pahat dan Bidang Potong pada Pemesinan Milling 5-axis Permukaan berkontur," *SNTTM VII*, 4 November 2008.
- [12] G. Kiswanto and A. Kholil, "Algoritma Penentuan Slicing Interval Pada Proses Rapid Prototyping," *SNTTM VII*, 4 November 2008.
- [13] G. Kiswanto, K. Nurdin, B. Harianti, and Aji, "Perancangan dan pengembangan Sistem Pendeteksian Multi Axis untuk pembuatan lintasan Gerak Robot Artikulasi 5 Derajat Kebebasan," *Seminar Nasional Cluster Riset Mesin 2009*, 12 Oktober 2009.
- [14] G. Kiswanto, K. Zulhendri, H. Benito, and P. Edikrisnha, "Multi-Axis Milling

- Optimization Through Implementation of Proper Operation Strategies in Machining Process," *the 11th International Conference on Quality in Research*, 3 Agustus 2009.
- [15] G. Kiswanto, A. S. Baskoro, K. Rendi, S. Rendry, Srijanto, and M. Budi, "Pengembangan Mesin Rapid Prototyping Berbasis FDM (fused Deposition Modeling) untuk Produk Berkontur dan Prismatic," *ICACZIZ 2010*, 20 November 2010.
- [16] G. Kiswanto and H. Prima, "Pengembangan Sistem Kontrol Pergerakan Robot Artikulasi 5 Derajat Kebebasan Berbasis Web," *SNTTM IX*, 13 Oktober 2010.
- [17] G. Kiswanto, Rahmat, and P. Edikrisnha, "Enhanced Modified Copying Method For 3-axis Roughing based on Faceted Models," *ICACZIZ 2010*, 20 November 2010.
- [18] G. Kiswanto, W. Rahmat, and P. Edikrisnha, "Bucketing Strategies for Efficient Triangle Detection In Cam-System Based on Faceted Models," *Jurnal Ilmu Komputer dan Informasi Fakultas Ilmu Komputer Universitas Indonesia*, vol. 3, februari 2010.
- [19] G. Kiswanto. and A. Y. T. Panuju, "Development of closed bounded volume(CBV) grouping method of complex faceted model through CBV Boundaries identification.," *IEEE*, vol. 3, p. 5, september 2010.
- [20] G. Kiswanto and M. Azka, "Automatic Part Primitive Feature Identification Based on Faceted Models," *international journal of computer science issues*, vol. 9, p. 7, 2012.
- [21] G. Kiswanto, J. Istiyanto, M. Bayu, and D. Surya, "Pengembangan Micromold dengan proses micromilling 3-axis," *SNTTM XI*, 12 Oktober 2012.
- [22] G. Kiswanto, A. Mujahid, and A. Rianto, "Enhancement of 5-Axis Micromilling Visibility through Visualization, Simulation and Video Streaming in a Faceted-based Cam-System," *2013 International Conference on Internet Service Technology and Information Engineering*, vol. 20, p. 6, 2013.
- [23] B. Lauwers, G. Kiswanto, and J. P. Kruth, "Development of a Five-axis Milling Tool Path Generation Algorithm based on Faceted Models," *CIRP Annals*, vol. 52, pp. 85-88, 2003.
- [24] G. Kiswanto, "Optimasi Proses Pemesinan Milling 3 Axis Pada Permukaan Kontur Dengan Segmentasi Model Faset 3D Berdasarkan Pola dan Arah Pemesinan," *SNTTM III*, 6 Desember 2004.
- [25] G. Kiswanto, A. S. Baskoro, and E. A. Syaefudin, "Initial Tool Orientation Set-up for 5-axis Flank Milling Based on Faceted Model," *Matec Web Conf*, vol. 108, p. 4, 2017.
- [26] G. Kiswanto, H. H. Sutrisno, and J. Istiyanto, "Non Machinable Volume Calculation Method For 5-Axis Roughing Based On Faceted Models Through Closed Bounded Area Evaluation," *2017 International Conference of Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering*, February 2017.
- [27] H. H. Sutrisno, G. Kiswanto, and J. Istiyanto, "The Improvement of the Closed Bounded Volume (CBV) Evaluation Methods to Compute a Feasible Rough Machining Area Based on Faceted Models " *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 215, p. 012041, maret 2017.