

Analisis Pengaruh Modifikasi Gerakan Pahat pada Proses Permesinan Rumah Poci Komponen Dies Drawing Pedal Brake dengan Software InventorCAM

Norman Iskandar^{a,*}, Fuad Arief Raharjo^a, Sri Nugroho^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH – Tembalang, Semarang 50275 Telp. (024) 7460059

*E-mail: norman.undip@gmail.com

Abstract

The brake pedal is an automotive component for footing on the braking system on three-wheeled vehicles. To make the brake pedal, it is necessary to have the die in the form of dies drawing brake pedal. One component of the dies is called the teapot component. The poci house is made of ST-42 steel material which serves as the main foundation and container of all the die components on the brake pedal drawing dies. The machining process that can be done to make a poci house is a milling process where there are three machining processes, namely the process of profile making, pocket making and the drill making process. One type of machine used to produce a teapot house is the CNC Hermle UWF 721H machine. Effective and efficient machining processes are needed to guarantee quality products with production costs along with minimal production time. This study examines the process of making teapot houses using InventorCAM software to determine the timing of machining, plotting and programming code (G-Code) of CNC machines that have been used so far whether it is optimal in cost and time calculation. Furthermore, the optimization process is carried out by modifying the stages of programming to find a more efficient and effective program. From the simulation results show that the modified machining process of the CNC home pot by changing the movement of profiling and making a hole (drill) obtained a shorter time which is to be 209.44 minutes before modification of 240.41 minutes. From financing by taking service rates from one of the companies in Semarang City where the tariff is Rp. 200,000 / hour, then the poci house produced before a program modification requires a service fee of Rp. 801,355.86, - and after modification, the cost required is reduced to Rp. 698,132.33

Keywords: CNC; dies; drawing; G-code; machining simulation

Abstrak

Pedal Brake adalah komponen otomotif untuk pijakan kaki pada sistem pengereman pada kendaraan roda tiga. Untuk membuat pedal brake diperlukan adanya dies berupa dies drawing pedal brake. Salah satu komponen dari dies tersebut adalah yang dinamakan komponen rumah poci. Rumah Poci terbuat dari material baja ST-42 yang berfungsi sebagai landasan utama dan wadah dari semua komponen die bawah pada dies drawing pedal brake. Proses permesinan yang dapat dilakukan untuk membuat rumah poci adalah proses milling dimana terdapat tiga proses permesinan yaitu proses pembuatan profil, pembuatan pocket dan pembuatan lubang (drill). Salah satu tipe mesin yang digunakan untuk memproduksi rumah poci adalah mesin CNC Hermle UWF 721H. Proses permesinan yang efektif dan efisien diperlukan untuk menjamin produk yang berkualitas dengan biaya produksi beserta waktu produksi yang minimal. Penelitian ini mengkaji proses pembuatan rumah poci menggunakan software InventorCAM untuk mengetahui waktu permesinan, plotting dan kode pemrograman (G-Code) mesin CNC yang selama ini digunakan apakah sudah optimal secara biaya dan perhitungan waktu. Selanjutnya dilakukan proses optimasi dengan memodifikasi tahapan pemrograman untuk mencari program yang lebih efisien dan efektif. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa hasil modifikasi proses permesinan CNC rumah poci dengan mengubah gerakan pembuatan profil dan pembuatan lubang (drill) diperoleh waktu yang lebih singkat yaitu menjadi 209,44 menit dimana sebelum dimodifikasi sebesar 240,41 menit. Dari sudut pembiayaan dengan mengambil tarif jasa dari salah satu perusahaan di Kota Semarang dimana tarifnya adalah sebesar Rp. 200.000/jam maka, rumah poci yang diproduksi sebelum dilakukan modifikasi program memerlukan biaya jasa sebesar Rp. 801.400,- dan setelah dilakukan modifikasi biaya yang diperlukan berkurang menjadi sebesar Rp. 698.150,-.

Kata kunci: CNC; dies; drawing; G-code; simulasi permesinan

1. Pendahuluan

Teknologi manufaktur saat ini cakupannya semakin meluas yaitu meliputi fase *styling, design, analysis, prototyping, testing* dan *manufacturing* [1]. Proses desain dan manufaktur dari produk uji coba serta cetakan, yang memerlukan begitu banyak *trial and error* memerlukan *lead time* yang sangat panjang. Pendekatan yang benar dalam fase ini merupakan kunci pegangan bisa mengurangi *lead time* dan biaya investasi [1, 2]. Dalam rangka mengurangi *lead time* dan biaya investasi untuk pengembangan dari proses *metal forming*, penggabungan teknologi dari *virtual prototyping and manufacturing* (VP&M) dan *physical prototyping and manufacturing* (PP&M) dengan konsep *concurrent engineering* sangat diperlukan. Konsep dasar dari *concurrent engineering* adalah semua aktivitas yang berhubungan dengan prosedur pengembangan produk yang harus dikerjakan secara simultan dan harus diterapkan sedari awal tahapan proses sebagai satu kesatuan yang terintegrasi [1]. Keuntungan *concurrent engineering* adalah bisa mengurangi biaya pengembangan dan biaya investasi serta meningkatkan kualitas produk. *Concurrent engineering* bisa terhubung dengan sangat efektif dengan memanfaatkan teknologi VP&M dimana didalamnya ada CAD/CAE/CAM dan PP&M meliputi RP&M dan tooling. CAD/CAM/CAE adalah bagian dari praktek VP&M sedangkan *rapid prototyping and manufacturing* (RP&M) adalah bagian praktis dari metode PP&M. Dalam proses *metal forming*, VP&M, PP&M diterapkan dan digunakan sebagai sarana investigasi dalam rangka untuk meningkatkan efisiensi dari pengembangan produk uji coba dan cetakan pada proses tersebut. Integrasi teknologi ini bisa memendekkan *lead time* serta mengurangi *investment cost* dalam periode tertentu. Keuntungan VP&M mudahnya dipahami tentang produk yang akan dibuat serta sistematika investigasi tentang pengaruh parameter proses dan pengaruh desain konfigurasi part yang dikerjakan pada tahap desain [1, 3]. PP &M memiliki karakteristik keuntungan seperti kemudahan evaluasi terhadap aspek geometri berkaitan tingkat kenyamanan dan desain gaya, kajian ergonomis, pengecekan sifat mampu produksinya serta berbagai fungsi pengujiannya. Hubungan secara teknis antara VP&M dan PP&M amat sangat diperlukan dalam proses *metal forming* [1].

Proses pembuatan cetakan secara modern cukup berbeda jika dibandingkan dengan proses permesinan konvensional. Teori dasar tentang proses pemotongan dan pemotongan geometri relative sama namun, teknik yang diterapkan dan teknologi yang dipakai sangat berbeda. Penggunaan software modern seperti CAM sangat membantu dalam mengoptimasi mesin dan peralatan untuk mencegah waktu tambahan proses permesinan dan tambahan biaya yang tidak perlu [4]. Penggunaan sistem yang sama antara CAD dan CAM seharusnya dilakukan dalam pengembangan yaitu proses pemodelan produk, desain dan perencanaan proses serta pemilihan *tool* yang digunakan. Hal ini untuk mencegah agar selama proses transfer data tidak terjadi permasalahan karena format sistem yang berbeda sehingga peluang cacat secara file tidak terjadi [4]. Dalam perkembangannya saat ini beberapa software komersial mengklaim hal ini sudah tidak terjadi lagi.

Dalam sistem CAM, NC (*Numerical Code*) memegang penting. NC yang kurang baik dapat menyebabkan: tabrakan alat di ruang kerja, masalah kualitas, dan ketidakefisienan proses [5, 6, 7]. Semua masalah ini berdampak negatif pada biaya produksi dan material [5, 8, 9]. Kode NC dapat di optimasi dimana proses optimasi NC meliputi dua tahapan. Tahap pertama optimasi struktur kode yaitu proses memangkas jumlah tahapan atau baris dari kode. Tahap kedua optimasi strategi permesinan yaitu meningkatkan stabilitas proses pemesinan dan efisiensi. Keterampilan, pengalaman dan kemampuan belajar dari programmer NC memiliki konsekuensi serius selama durasi perencanaan strategi [10] dan kualitas kode NC, yang pada gilirannya berdampak pada kualitas produk [11] dan efisiensi proses permesinan [12].

Sebagian besar software CAM profesional saat ini sudah mampu berjalan dengan jalur lima sumbu dan hal ini menjadi jauh lebih bisa diandalkan untuk menghasilkan produk cetakan yang memiliki keakuratan geometri yang tinggi. Namun dalam realita dilapangannya untuk menjalankannya masih sering ditemui kendala seperti benturan yang mungkin terjadi dari pemrograman yang kurang tepat. Hal ini perlu segera diselesaikan untuk lebih mengoptimalkan perangkat ini.

Dalam perkembangannya telah banyak sekali dimunculkan software untuk simulasi proses milling yang dikeluarkan oleh peneliti atau perusahaan. Berbagai pendekatan berbeda telah dikembangkan dimana tiga pendekatan utama dalam simulasinya adalah simulasi diskrit, metode berbasis solid, dan hybrid. Beberapa perangkat simulasi yang telah diperkenalkan dan digunakan di industri dipisah terpisah seperti Z-buffer [13,14,15], G-buffer [13,16,17,18,19], dixel [13,20,21], ray casting [22], dll. Metode ini memberikan keuntungan proses lebih sederhana dan hemat waktu namun hasilnya adalah beberapa simulasi yang dihasilkan menjadi tidak akurat. Keuntungan dari pendekatan ini adalah untuk menyederhanakan atau menghindari operasi Boolean yang memakan waktu

Pemanfaatan teknologi permesinan modern yang terkoneksi dengan komputer seperti pada mesin CNC pada penggunaannya sangat membantu pekerjaan operator dalam membuat produk. Proses pemesinan *milling* dengan menggunakan mesin CNC milling, merupakan salah satu proses pemesinan yang banyak digunakan untuk pembuatan suatu komponen. Dalam proses pemesinan *milling* waktu yang dibutuhkan untuk membuat komponen harus seminimal mungkin agar tercapai kapasitas produksi yang tinggi [23]. Sebuah desain yang optimal untuk proses produksi dari logam lembaran merupakan hal yang sangat penting. Telah banyak hal diteliti dan dicoba termasuk didalamnya tentang desain dan simulasi permesinan untuk membuat cetakan, dimana mayoritas membawa keberhasilan hasil yang memuaskan dalam proses optimasi *sheet metal forming process* [24-28].

Penggunaan proses *milling* salah satunya adalah untuk membuat *dies* atau cetakan untuk proses *forming* logam lembaran. Salah satu produk proses *milling* adalah rumah poci yang merupakan salah satu komponen dari *dies drawing pedal brake* yang nantinya digunakan untuk proses *forming* logam lembaran yang di cetak menjadi pedal brake pada

kendaraan roda tiga. Proses *milling* untuk membuat rumah poci dilakukan dengan menggunakan mesin CNC Hermle UWF 721H.

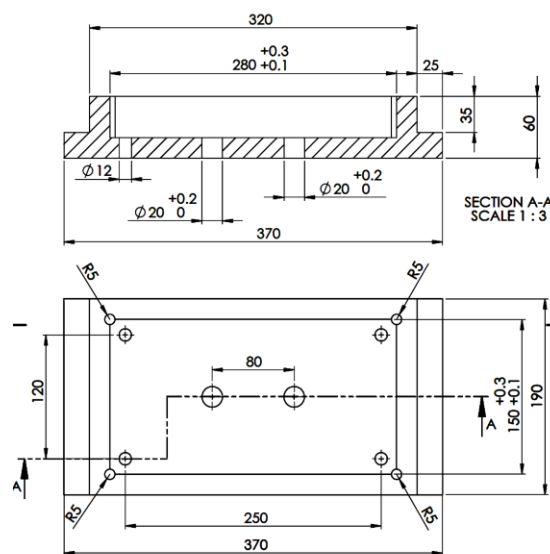
Untuk menghasilkan produk yang berkualitas baik namun proses dapat dikerjakan secara efektif dan efisien, proses pembuatan program CNC menjadi hal kunci. *Dies* atau cetakan adalah komponen produksi yang memiliki harga atau biaya produksi yang mahal dan memiliki spesifikasi yang ketat karena diharapkan produk yang dihasilkan tidak mengalami cacat dan banyak yang dibuang karena gagal.

Penelitian ini berupaya memanfaatkan sebuah software yang bernama InventorCAM untuk dicoba digunakan untuk menganalisis kode G-Code program CNC yang telah dipakai perusahaan untuk membuat rumah poci. Dengan InventorCAM akan dikaji kode G-Code yang selama ini telah digunakan apakah sudah efisien dan efektif secara biaya dan waktu. Selanjutnya akan dikaji jika program dimodifikasi apakah dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi proses pembuatan cetakan yang selama ini digunakan.

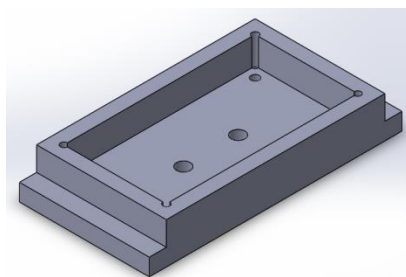
2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Rumah Poci

Rumah Poci merupakan salah satu komponen dari *dies drawing pedal brake* yang terbuat dari material baja ST-42 yang berfungsi sebagai landasan utama dan wadah dari semua komponen *die* bawah pada *dies drawing pedal brake*. Adapun bentuk dan dimensi dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 berikut.



Gambar 1. Gambar 2D Rumah poci.



Gambar 2. Gambar 3D Rumah poci.

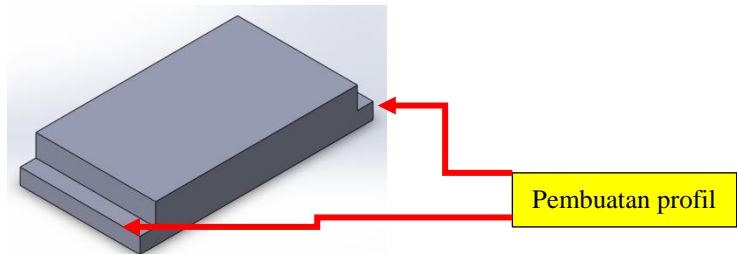
2.2 Proses Permesinan Rumah Poci Menggunakan Mesin CNC

Rumah poci diproduksi dengan menggunakan proses *milling* pada mesin CNC Hermle UWF 721H seperti pada Gambar 3. Adapun tahapan proses permesinan rumah poci sebagai berikut.



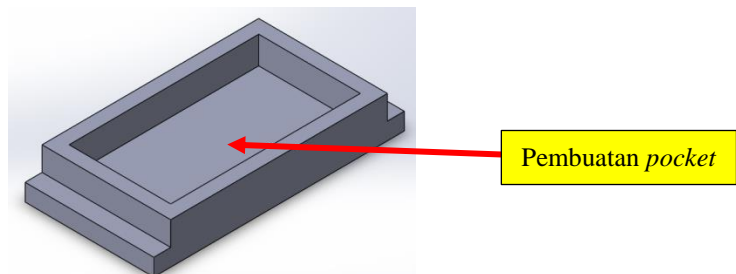
Gambar 3. Mesin CNC Hermle UWF 721H.

- a. Proses pemotongan
Material ST-42 dipotong (*cutting*) menggunakan mesin AMADA VM-1200 dipotong menjadi berukuran 370x190x60 mm dengan toleransi 0,5 mm.
- b. Proses pembuatan profil
Proses untuk membuat profil pada bagian samping kanan dan kiri dari rumah poci dengan jarak 25 mm dari tepi dan kedalaman 35 mm menggunakan pahat *end mill* ϕ 27 mm seperti terlihat pada Gambar 4.



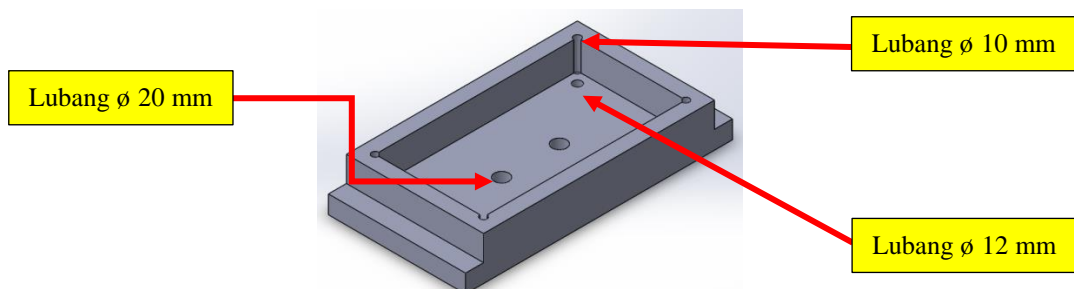
Gambar 4. Pembuatan profil rumah poci.

- c. Proses pembuatan pembuatan *pocket*
Gambar 5 adalah proses untuk membuat kantong pada bagian dalam dari rumah poci adapun *tools* yang digunakan adalah pahat *facing* ϕ 40 mm untuk pemotongan kasar dan pahat *end mill* ϕ 7 mm untuk pemotongan tepi *pocket*.



Gambar 5. Pembuatan *pocket* rumah poci.

- d. Proses pembuatan lubang (*drill*)
Proses lubang pada rumah poci dimana terdapat tiga jenis pahat *drill* yang digunakan diantaranya pahat dengan ukuran ϕ 10 mm, ϕ 12 mm dan ϕ 20 yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pembuatan lubang (*drill*) rumah poci.

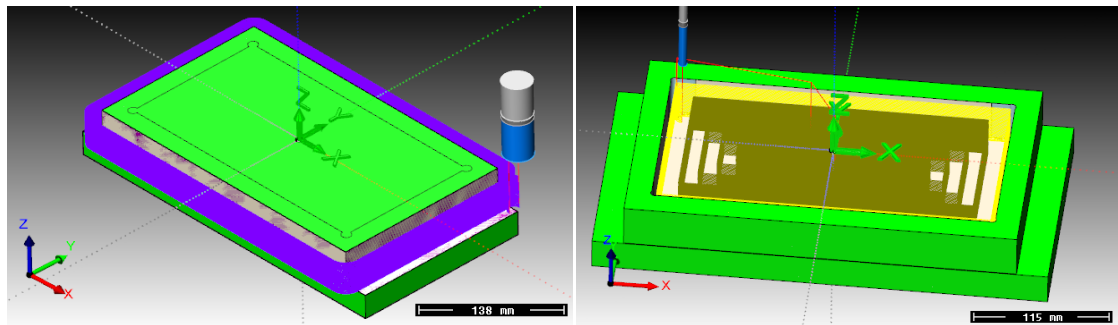
2.3 Diagram Alir Simulasi Permesinan Menggunakan InventorCAM

Proses simulasi pembuatan komponen *dies drawing pedal brake* menggunakan software bernama InventorCAM dimana mampu mensimulasi waktu dan kode pemrograman untuk mesin CNC sehingga mempermudah proses pengerjaan untuk membuat part atau komponen.

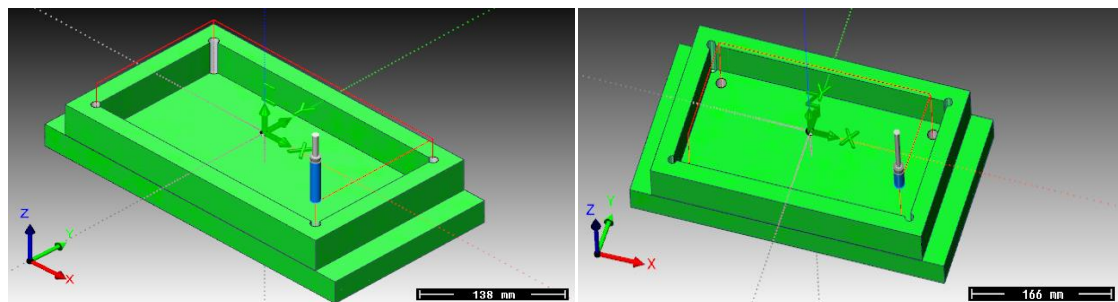
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil *Plotting* dan Waktu Permesinan Rumah Poci dengan InventorCAM Mengacu Data Awal Operator

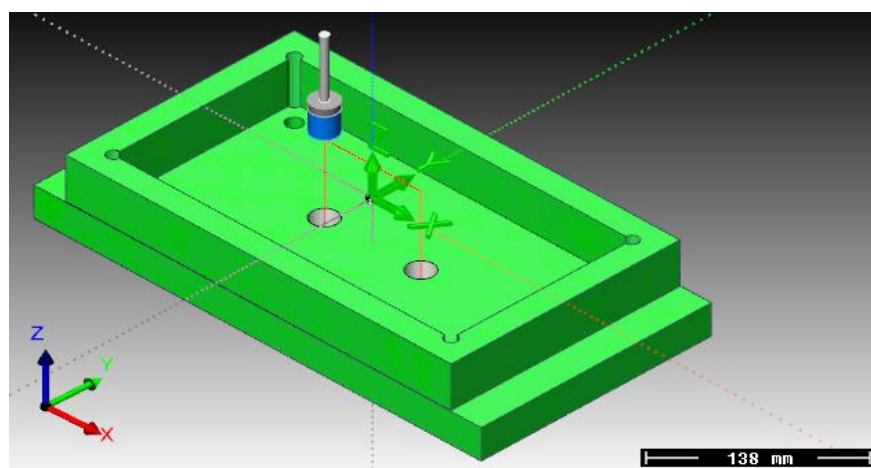
Hasil simulasi menggunakan InventorCAM untuk pembuatan rumah poci salah satu komponen *dies drawing pedal brake* diperoleh hasil *plotting* untuk pembuatan profil, *pocket* dan jenis pembuatan lubang (*drill*) berdasarkan operator produksi dapat dilihat seperti pada Gambar 7 sampai Gambar 9.



Gambar 7. *Plotting* pada pembuatan profil dan *pocket* rumah poci.



Gambar 8. *Plotting* pada pembuatan lubang (*drill*) ϕ 10 mm dan pembuatan lubang (*drill*) ϕ 12 mm rumah poci.



Gambar 9. *Plotting* pada pembuatan lubang (*drill*) ϕ 20 mm rumah poci.

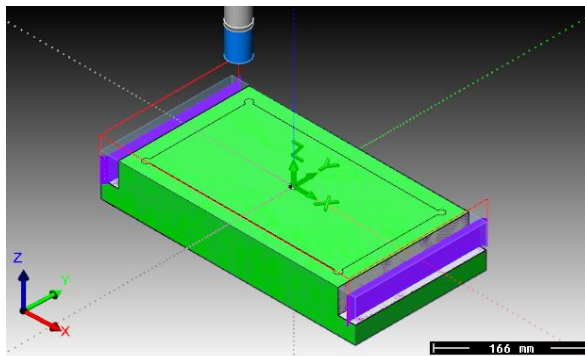
Dari hasil simulasi *plotting* menunjukkan bahwa InventorCAM secara otomatis mengkonfigurasi gerakan pahat yang sesuai dengan keinginan pengguna (*user*). Hasil simulasi dapat menunjukkan waktu permesinan untuk setiap proses yang dapat dinyatakan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil simulasi waktu permesinan sebelum dimodifikasi pada InventorCAM.

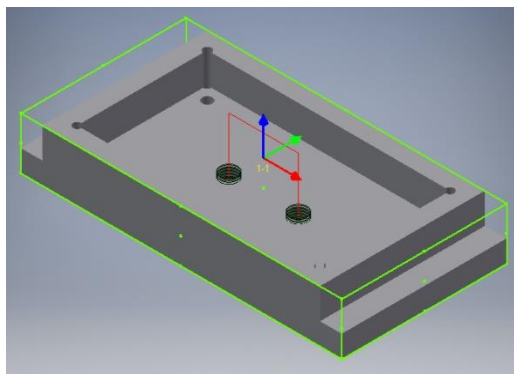
No.	Proses Permesinan	Waktu Permesinan (Menit)
1.	Pembuatan Profil	51,45
2.	Pembuatan <i>Pocket</i>	158,13
3.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 10 mm	0,35
4.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 12 mm	0,28
5.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 20 mm	0,2
6.	Total Waktu Setting dan Pergantian Pahat	30
Total waktu permesinan		240,41

3.2 Hasil *Plotting* dan Waktu Permesinan Rumah Poci Setelah Dimodifikasi pada InventorCAM

Modifikasi proses permesinan pada pembuatan profil dan pembuatan lubang (*drill*) menunjukkan penurunan waktu permesinan seperti pada Gambar 10 dan Gambar 11. Modifikasi proses pembuatan profil dimana gerakan pemakanan melingkari rumah poci dirubah menjadi gerakan pemotongan tiap sisi pada tepi rumah poci. Modifikasi pembuatan lubang (*drill*) merubah gerakan pemakanan G81 menjadi G73 dikarenakan untuk gerakan dari poros pendorong ketika membentuk *pedal brake* diperoleh waktu yang relatif lebih lama namun hasil permukaan yang sangat halus disebabkan G73 gerak pemakanan naik turun yang kontinyu sedangkan G81 hanya gerak pemakanan lurus.



Gambar 10. Hasil *plotting* modifikasi gerakan pemakanan profil rumah poci.



Gambar 11. Modifikasi gerakan pemakanan G73 pada pembuatan lubang ϕ 20 mm.

Tabel 2. Hasil simulasi waktu permesinan setelah dimodifikasi pada InventorCAM.

No.	Proses Permesinan	Waktu Permesinan (Menit)
1.	Pembuatan Profil	20,43
2.	Pembuatan <i>Pocket</i>	158,13
3.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 10 mm	0,35
4.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 12 mm	0,28
5.	Pembuatan <i>Drill</i> ϕ 20 mm	0,25
6.	Total Waktu Setting dan Pergantian Pahat	30
Total waktu permesinan		209,44

Hasil simulasi menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk membuat rumah poci dengan proses CNC membutuhkan waktu sebesar 240,41 menit sedangkan waktu permesinan setelah dimodifikasi sebesar 209,44 menit seperti terlihat pada Tabel 2. Hhal tersebut dikarenakan kecepatan pemakanan, *step*, gerakan pemakanan dan jenis pahat

yang digunakan sangat mempengaruhi dalam proses permesinan. Semakin cepat kecepatan pemakanan dan *step* semakin dalam proses permesinan semakin cepat namun pahat akan cepat aus dan mudah rusak sehingga diperlukan pahat yang memiliki spesifikasi yang tinggi.

3.12 Perhitungan Harga Jasa Pembuatan CNC

Harga jasa pembuatan CNC untuk produk *dies* relatif cukup mahal namun memiliki kualitas yang bagus dengan ketelitian dan keakuratan mesin CNC yang terbaru. Proses pembuatan rumah poci hanya menggunakan proses permesinan CNC tanpa proses *heat treatment* [3].

Perhitungan :

- a. Harga biasa = (Harga jasa x waktu proses permesinan)
- b. Harga dengan heat treatment = 2 (Harga jasa x waktu proses permesinan)

Parameter yang didapat dari hasil simulasi sebelum dimodifikasi :

Waktu simuasi + Setting	= 240,41 menit
Harga jasa	= Rp. 200.000,00/jam = 200.000/60 = Rp 3.333,33/menit
Harga dengan Heat treatment	= 2 x harga jasa
Harga Jasa biasa	= {(waktu simulasi + waktu setting) x harga jasa}
	= {(240,41) menit x Rp.3333,33/menit}
	= Rp. 801.365,86
	= Rp. 801.400,-

Parameter yang didapat dari hasil simulasi setelah dimodifikasi :

Waktu simuasi + Setting	= 209,44 menit
Harga jasa	= Rp. 200.000,00/jam = 200.000/60 = Rp 3.333,33/menit
Harga dengan Heat treatment	= 2 x harga jasa
Harga Jasa biasa	= {(waktu simulasi + waktu setting) x harga jasa}
	= {(209,44) menit x Rp. 3333,33/menit}
	= Rp. 698.132,33
	= Rp. 698.150,-

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi waktu permesinan dan *plotting* dengan menggunakan software InventorCAM terhadap proses pembuatan rumah poci dengan mesin CNC, dapat dihasilkan kesimpulan bahwa hasil modifikasi proses permesinan CNC rumah poci dengan mengubah gerakan pembuatan profil dan pembuatan lubang (*drill*) diperoleh waktu yang lebih singkat sebesar 209,44 menit dibandingkan hasil sebelum dimodifikasi sebesar 240,41 menit serta biaya yang dikeluarkan sebelum dan setelah modifikasi adalah sebesar Rp. 801.365,86 dan Rp. 698.132,33.

Daftar Pustaka

- [1] D.Y. Yang, D.G. Ahn, C.H. Lee, C.H. Park, T.J. Kim. 2002. Integration of CAD/CAM/CAE/CP for the Development of Metal Forming Process. *Journal of Materials Processing Technology*;125-126: 26-34.
- [2] K. Park, J.W. Yoon, D.Y. Yang, J.R. Cho. 1997. Concurrent Engineering Approach to Die Design of Metal Forming Processes using Rapid Prototyping and Finite Element Analysis. *Proceedings of the 30th International Symposium an Automotive Technology and Automation*. Florence, Italy.
- [3] C.K. Chua, S.H. The, R.K. Gay. 1999. Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*; 15:597.
- [4] P. Krajnik, J. Kopa. 2004. Modern Machining of Die and Mold Tools. *Journal of Materials Processing Technology*;157-158 :543-552.
- [5] Malgorzata Plaza, Wojciech Zebala. 2019. A Decision Model for Investment Analysis in CNC Centers and CAM Technology. *Computers & Industrial Engineering*;131:565-577.
- [6] Matras, A., & Plaza, M. 2016. The FEM Simulation of the Thin Walled Aircraft Engine Corpus Deformation During Milling. *Proceedings of SPIE, 10031*(1-9).
- [7] Miko, B., & Beño, J. 2014. Effect of the Working Diameter to the Surface Quality in Freeform Surface Milling. *Key Engineering Materials, 581*, 372-377.
- [8] Chanda, A., Fischer, A., Eberhard, P., & Dwivedy, S. K. 2014. Stability Analysis of A Thinwalled Cylinder in Turning Operation using the Semi-Discretization Method. *Acta Mechanica Sinica, 30*(2), 214-222.
- [9] Lu, K., Zhang, Z., Jing, M., Wang, Y., Liu, H., & Wu, T. (2016). Dynamic Optimization Of Multipass Turning of a Flexible Workpiece Considering the Effect of Cutting Sequence. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85*(1-4), 325-335.
- [10] Plaza, M., Zebala, W., & Matras, A. 2019. Decision System Supporting Optimization of Machining Strategy. *Computers & Industrial Engineering, 127*, 21-38.

- [11] Diplaris, S. C., & Sfan Tsikopoulos, M. M. 2000. Cost-Tolerance Function. A New Approach for Cost Optimum Machining Accuracy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(1), 32–38.
- [12] Makhe, A., & Frank, M. C. 2010. Polygon Subdivision for Pocket Machining Process Planning. *Computers & Industrial Engineering*, 58(4), 709–716.
- [13] Klaus Weinert, Shangjian Du, Patrick Damm, Marc Stautner. 2004. Swept Volume Generation for The Simulation of Machining Processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*;44:617–628.
- [14] T. van Hook, 1986. Real Time Shaded NC-Milling Display, Proc. SIGGRAPH '86. *Computer Graphics*, 20 (4), pp. 15–20.
- [15] R.B. Jerard, S.Z. Hussaini, R.L. Drysdale, B. Schaudt, 1989. Approximate Methods for Simulation and Verification of Numerically Controlled Machining Programs, *The Visual Computer* 5 (6):329–348.
- [16] T. Saito, T. Takahashi, 1991. NC-Machining with G-Buffer Method, Proc. SIGGRAPH '91. *Computer Graphics*, 25 (4), pp. 207–216.
- [17] J. Crossman, D. Yoon, 2000. A Cutter Motion Simulation System, *Transaction of the Society for Design and Process Science* 4 (1): 25–35.
- [18] G. Glaeser, E. Großer, 1998. Efficient Volume-Generation During the Simulation of NC-Milling, in: H.-C. Hege, K. Polthier (Eds.), *Mathematical Visualization*, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 89–106.
- [19] Y. Kim, G. Varadhan, M. Lin, D. Manocha, 2003. Fast Swept Volume Approximation of Complex Polyhedral Models, *ACM Symposium on Solid Modeling And Applications*, Seattle, Washington, June 16–20, 2003.
- [20] Y. Huang, J.H. Oliver, 1994. NC-Milling Error Assessment and Tool Path Correction, *Computer Graphics Proceedings, Conference Proceedings (Proc. SIGGRAPH '94)*, July 24-19, pp. 287–294.
- [21] K. Weinert, G. Guntermann, M. Stautner, 2001. Effiziente Simulation Wird Möglich, *FormWerkzeug* 36 (6): 36–38.
- [22] W.P. Wang, K.K. Wang, 1986. Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids, *IEEE Computer Graphic Applications* 6 (12):8–17.
- [23] Kalpakjian, Serope, Schmid, Steven R. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology* Ed 6th SI Units. Singapore: Prentice Hall.
- [24] Ghouati O, Lenoir H, Gelin JC. 1999. Optimization Techniques for the Drawing of Sheet Metal Parts. In: *Proceeding of NUMISHEET'99*. p. 293–8.
- [25] Gantar G, Pepelnjak T, Kuzman K. 2002. Optimization of Sheet Metal Forming Processes by the Use of Numerical Simulations. *J Mater Process Tech*; 130–131:54–9.
- [26] Katayama T, Nakamachi E, Nakamura Y, Ohata T, Morishita Y, Murase H. 2004. Development of Process Design System for Press Forming-Multi-Objective Optimization of Intermediate Die Shape in Transfer Forming. *J Mater Process Tech*;155–156:1564–70.
- [27] Guo YQ, Batoz JL, Naceur H, Bouabdallah S, Mercier F, Barlet O. 2000. Recent Developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts using a Simplified Inverse Approach. *Comput Struct*;78:133–48.
- [28] Naceur H, Delamziere A, Batoz JL, Guo YQ, Knopf-Lenoir C. 2004. Some Improvements on the Optimum Process Design in Deep Drawing using the Inverse Approach. *J Mater Process Tech*;146:250–62.