

ANALISIS LAJU DEFORMASI PAHAT HSS PADA SIMULASI PEMBUBUTAN MESIN CNC DENGAN APLIKASI ANSYS

*Analysis of HSS Tool Deformation Rate on CNC Machine Turning Simulation with
ANSYS Application*

Yakobus Rhio Widodo¹, Gian Villany Golwa^{1*}

¹ Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat, DKI
Jakarta 11650, Indonesia.

* Email Korespondensi : gianvgolva@mercubuana.ac.id

Artikel Info - : Diterima : 12-07-2023; Direvisi : 15-11-2023; Disetujui : 21-11-2023

ABSTRAK

Tuntutan untuk meningkatkan kualitas dan produktivitas di dunia industri manufaktur mendasari analisa terhadap laju deformasi pahat pada proses pembubutan. Metode-metode yang sudah digunakan sebelumnya dirasa masih kurang akurat dan informasi yang diberikan kurang lengkap. Oleh sebab itu maka diperlukan simulasi yang detail dan akurat untuk menentukan nilai deformasi dan regangan pada pahat *high speed steel* (HSS). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh nilai deformasi dan regangan pada pahat HSS dalam proses pembubutan dengan benda kerja baja ST42 dengan metode *finite element methods* (FEM). Dalam penelitian ini analisis dilakukan dengan menggunakan aplikasi ANSYS *explicit dynamics*. Penggunaan aplikasi ANSYS *explicit dynamics* bertujuan untuk menyimulasikan fenomena fisik yang kompleks dengan cara memasukkan parameter yang sudah ditentukan meliputi diameter, putaran *spindel* dan *properties* dari benda kerja dan pahat. Pada simulasi ini menggunakan pahat HSS dengan benda kerja berupa baja ST42. Variabel pada penelitian kali ini adalah diameter benda kerja 30 mm, 40 mm, 50 mm dengan panjang sama yaitu 200 mm. Dari hasil simulasi diperoleh nilai deformasi maksimal pahat HSS pada benda kerja \varnothing 30 mm adalah 205,04 μm pada langkah waktu $1,0 \times 10^{-4}$ detik, pada benda kerja \varnothing 40 mm adalah 205,19 μm pada langkah waktu $1,0 \times 10^{-4}$ detik, dan untuk benda kerja \varnothing 50 mm deformasi pahat sebesar 205,23 μm pada langkah waktu $1,0 \times 10^{-4}$ detik. Di samping itu didapat pula nilai regangan pada pahat HSS dengan benda kerja \varnothing 30 mm sebesar 0,689 μm pada waktu langkah $1,00 \times 10^{-4}$ detik, dengan benda kerja \varnothing 40 mm sebesar 0,783 μm pada waktu langkah $1,0011 \times 10^{-4}$ detik dan pada benda kerja \varnothing 50 mm didapat nilai regangan pada pahat sebesar 0,866 μm pada waktu langkah $1,00 \times 10^{-4}$ detik.

Kata Kunci: Simulasi Pembubutan, Laju Deformasi Pahat, Regangan Elastik, Pahat HSS

ABSTRACT

The demand to improve quality and productivity in the manufacturing industry underlies the analysis of tool deformation rates in the turning process. The methods used previously are considered inaccurate, and the provided information is incomplete. Therefore, detailed and accurate simulations are needed to determine deformation and strain values in HSS chisels. This study aims to obtain deformation and strain values on high speed steel (HSS) chisels in the process of turning ST42 steel workpieces using the finite element methods (FEM) method. The analysis was carried out using the ANSYS explicit dynamics application. This application aims to simulate complex physical phenomena by entering predetermined parameters, including diameter, spindle rotation, and workpiece and tool properties. HSS chisels are used in this simulation with ST42 steel workpieces. The variables in this study were the workpiece diameters of 30 mm, 40 mm, and 50 mm, with the same length of 200 mm. From the simulation results, it is evident that the maximum deformation value of the HSS tool on a \varnothing 30 mm workpiece is 205.04 μm at a time step of 1.0×10^{-4} seconds. On a \varnothing 40 mm workpiece, it is 205.19 μm at the same time step, and for a workpiece with a \varnothing 50 mm, the tool deformation is 205.23 μm at the same time step. Additionally, the strain value on the HSS chisel with a workpiece \varnothing 30 mm is 0.689 μm at a time step of 1.0×10^{-4} seconds. For a workpiece with a \varnothing 40 mm, the strain is

0.783 μm at a time step of 1.0011×10^{-4} seconds, and on a workpiece with a $\varnothing 50$ mm, the final strain on the tool is 0.866 μm at a time step of 1.0×10^{-4} seconds.

Keywords: Turning Simulation, Deformation Rate, Elastic Strain, HSS Tool

1. Pendahuluan

Pada proses pembubutan kualitas pahat sangat mempengaruhi hasil produk dari pembubutan tersebut. Pahat yang baik mampu menghasilkan produk yang baik dari segi dimensi maupun kekasaran permukaan. Pahat adalah bagian yang paling kritis pada proses pemesinan. Pahat merupakan bagian produksi yang dapat digunakan dan harganya relatif mahal. Kerusakan pada alat harus dihindari, karena gaya pemotongan yang sangat tinggi dapat merusak pahat, alat mesin, benda kerja dan membahayakan operator, serta merusak toleransi bentuk dan kualitas produksi secara serius [1].

Pada beberapa kasus di industri pemesinan khususnya *computer numerical control* (CNC), sering terjadi *not good* (NG) produk masal yang diakibatkan kelalaian operator dalam pengecekan produk. NG produk tersebut diakibatkan oleh pahat yang sudah aus atau terdeformasi sehingga mengakibatkan *setting* mesin CNC tidak sesuai dengan yang dikehendaki. Belum ada ilmu atau teknik untuk menghitung deformasi pahat sehingga kapan terjadinya deformasi pahat yang ditoleransi dapat diatasi [2]. Maka dari itu penelitian kali ini mencoba untuk menghitung laju deformasi pahat khususnya pahat *high speed steel* (HSS) agar di kemudian hari dapat diterapkan untuk industri pemesinan untuk memperkirakan kapan pahat tersebut harus diganti.

Pada penelitian Fahrizal dan Suprpto, telah dilakukan eksperimen tentang keausan pahat. Keausan pahat disebabkan oleh gaya gesek antara benda kerja dan pahat sehingga akan terjadi deformasi dan regangan elastis pada pahat [3]. Sedangkan pada jurnal yang ditulis Mujiarto dan Kusairi, menjelaskan keausan pahat sampai batas tertentu sehingga pahat tidak dapat digunakan lagi. Nilai ambang batas yang diizinkan pada nilai laju deformasi dan regangan elastis tiap proses pembubutan berbeda-beda [4]. Pada penelitian Lubis dkk. mengenai pahat karbida, umur pahat dapat ditentukan melalui variabel *cutting speed* jika menggunakan jenis benda kerja yang sama. Semakin cepat *cutting speed* maka temperatur pahat dan laju keausan juga semakin tinggi. Hal ini akan mempengaruhi nilai laju deformasi dan regangan elastis juga [5,6].

Pada penelitian ini digunakan pahat HSS. Pahat HSS dipilih karena pada proses pemesinan sering terjadi beban kejut, atau proses pemesinan yang sering dilakukan interupsi (terputus-putus) [7]. Hal tersebut misalnya membubut benda segi empat menjadi silinder, membubut bahan benda kerja hasil proses penuangan, dan membubut eksentris (proses pengasarannya). Pada penelitian Sudjatmiko dkk. mengenai karakteristik dan umur pahat HSS didapatkan kesimpulan umur pahat dapat dihitung dengan persamaan Taylor, sedangkan deformasi dan regangan elastis hanya merepresentasikan perubahan bentuk dan sifat mekanik dari pahat itu sendiri. Pada jurnal yang sama juga telah dilakukan eksperimental tentang keausan pahat HSS, didapatkan kesimpulan bahwa karakteristik keausan pahat HSS yang sering tumbuh adalah keausan abrasif [8].

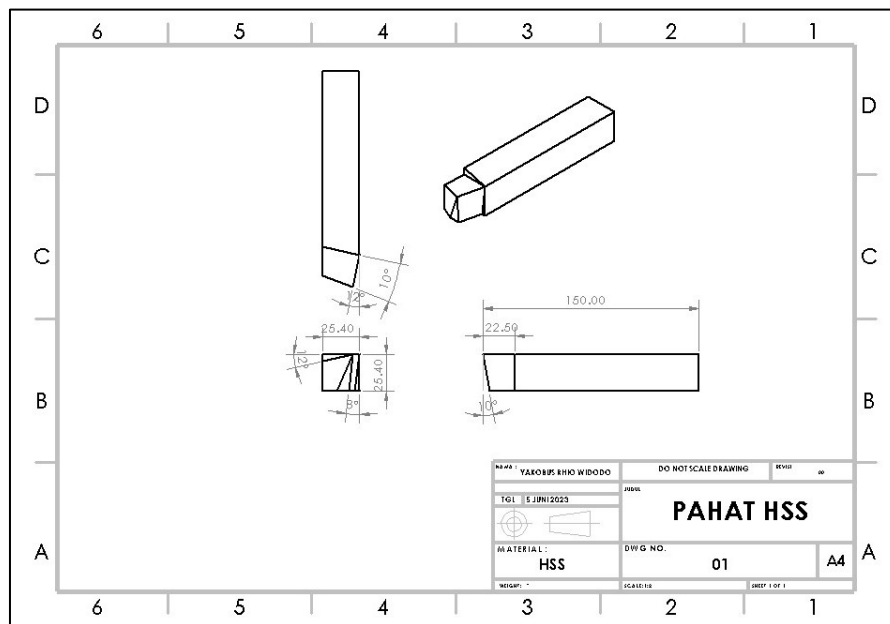
Pada penelitian kali ini akan menjelaskan bagaimana proses simulasi laju deformasi pahat HSS yang digunakan untuk membubut benda kerja baja ST42. Simulasi dilakukan menggunakan *ANSYS explicit dynamics*. Simulasi ini berbasis perhitungan *finite element methods* (FEM) sehingga harapannya eror yang terjadi antara simulasi dan di lapangan tidak terlalu besar [9]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mengetahui laju deformasi pahat HSS sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan kapan waktu yang tepat untuk mengganti pahat.

2. Metodologi Penelitian

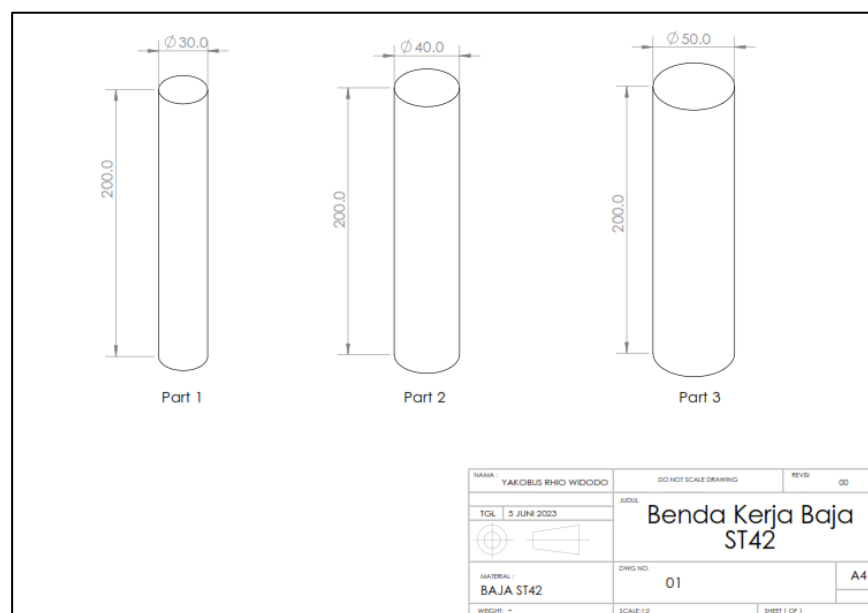
Penelitian dilakukan menggunakan *software ANSYS explicit dynamics* dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Tahapan studi literatur pada simulasi ini bertujuan untuk menentukan tipe atau fitur aplikasi *ANSYS* yang akan digunakan. Untuk Fitur yang akan digunakan adalah *ANSYS explicit dynamics*,

- hal ini dikarenakan simulasi akan melibatkan benda yang bergerak dimana benda kerja akan berputar dan pahat akan bergerak menyayat benda kerja.
2. Persiapan alat dan bahan. Pada tahap ini dilakukan persiapan alat berupa PC atau laptop yang memiliki spesifikasi untuk menjalankan program ANSYS. Selanjutnya dilakukan instal aplikasi ANSYS pada laptop. Laptop yang digunakan adalah Laptop ASUS VivoBook 15 M513UA. Untuk software menggunakan ANSYS. Fitur ANSYS yang digunakan adalah ANSYS explicit dynamics hal ini dikarenakan akan dilakukan simulasi dengan benda yang bergerak.
 3. Pemodelan pahat dan benda kerja (lihat Gambar 1 dan 2). Proses pemodelan dilakukan dengan aplikasi bantuan berupa solidworks 2023 dengan ukuran dimensi yang sudah ditentukan sebelumnya. Dimensi komponen pahat dan benda kerja.

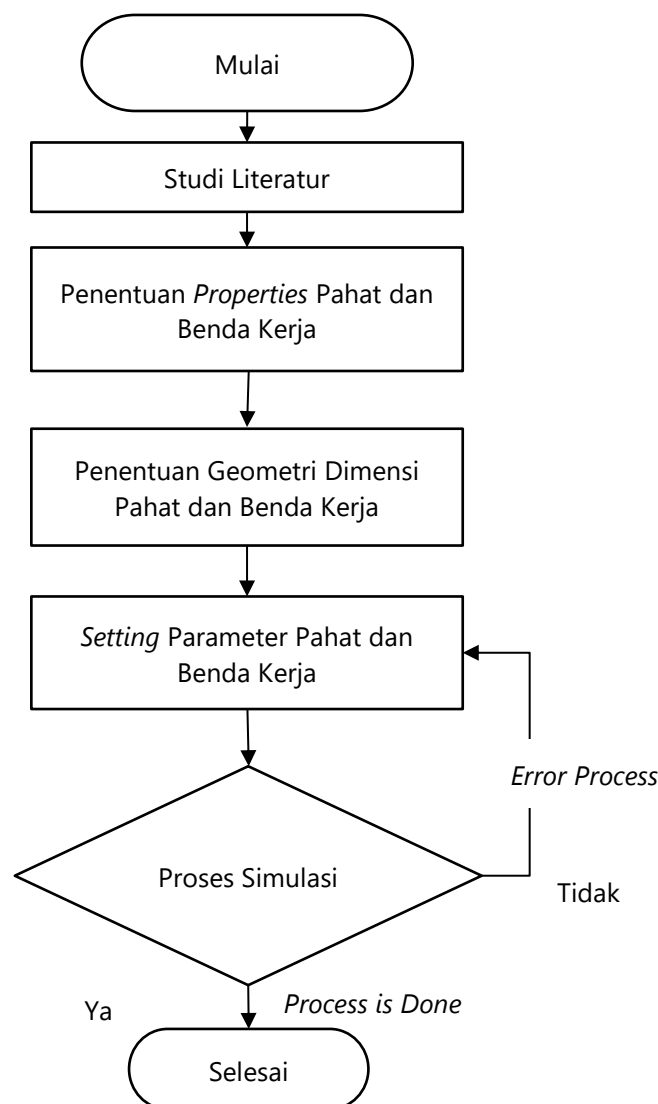


Gambar 1. Desain Pahat



Gambar 2. Desain Benda Kerja

4. Proses *meshing* yaitu proses penentuan titik-titik yang akan dilakukan simulasi pada pahat maupun benda kerja. Penjelasan lebih lanjut terdapat pada diagram alir simulasi.
5. Pada proses ini simulasi dilakukan dengan aplikasi *ANSYS explicit dynamics*. Selama proses simulasi akan muncul data berupa laju deformasi dan regangan pada pahat HSS. Tahap dan proses terperinci terdapat pada diagram alir simulasi.
6. Pada tahap ini data yang sudah didapat pada tahap simulasi akan diolah dengan mencari penyebab adanya fenomena naik turunnya grafik pada deformasi dan regangan pahat HSS.
7. Proses penulisan laporan dilakukan untuk menyajikan hasil pengolahan data ke dalam laporan karya ilmiah.
8. Tahap ini menandakan rangkaian proses penelitian telah selesai dan data yang sudah diolah siap untuk disajikan dalam bentuk karya ilmiah.



Gambar 3. Diagram Alir Simulasi

Berdasarkan Gambar 3, dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Tahap Mulai. Tahapan ini menandakan dimulainya rentetan tahapan simulasi dengan aplikasi ANSYS.

2. Studi Literatur. Tahapan studi literatur pada simulasi ini bertujuan untuk menentukan tipe atau fitur aplikasi ANSYS yang akan digunakan. Untuk Fitur yang akan digunakan adalah ANSYS *explicit dynamics*, hal ini dikarenakan simulasi akan melibatkan benda yang bergerak dimana benda kerja akan berputar dan pahat akan bergerak menyayat benda kerja.
3. Penentuan *Properties*. Penentuan *properties* ini sangat penting dilakukan karena pada tahap ini merupakan penentuan jenis dari material benda kerja dan pahat yang akan disimulasikan.
4. Penentuan Geometri Pahat dan Benda Kerja. Pada proses penentuan geometri dimensi pahat dan benda kerja ini yang diinput adalah desain yang sebelumnya sudah dibuat dalam aplikasi SolidWork dalam bentuk benda kerja dan pahat sudah digabungkan.
5. *Setting Parameter*. Untuk menjalankan simulasi terdapat beberapa parameter yang harus diatur, diantaranya:
 - a) Sistem koordinat. Dalam menu sistem koordinat harus ditambahkan dua sistem koordinat yang nantinya digunakan sebagai acuan gerak. Salah satu sistem koordinat bertipe *cartesian* pada benda kerja dan satu lagi bertipe sama diletakkan pada komponen pahat.
 - b) *Connection*. Pada menu ini diatur sisi-sisi yang akan saling bersinggungan dimana yang akan berkontak adalah mata pahat dengan target kontaknya benda kerja.
 - c) *Meshing*. Pada menu ini dilakukan proses *meshing* pada semua komponen yang ada (benda kerja, mata pahat, dan *holder* pahat). Besaran resolusi untuk *meshing* adalah 4, namun karena dirasa benda kerja masih terlalu renggang *meshingnya* maka diberikan *body sizing* yang bertujuan untuk memperapat *meshing* hanya pada area benda kerja saja. Ukuran untuk *body sizing* ini sebesar 4 mm untuk benda kerja berdiameter 30 mm dan 40 mm, dan berukuran 5 mm untuk benda kerja berdiameter 50 mm. Hal ini dikarenakan tipe aplikasi ANSYS yang digunakan adalah tipe ANSYS *student* yang membatasi banyaknya butiran atau elemen setelah proses *meshing*.
 - d) Penentuan kondisi simulasi. Kondisi simulasi yang diatur adalah besar kecepatan potong (*cutting speed*) dan putaran mesin.

Tabel 1. Parameter Proses Pembubutan

Vc (m/menit)	d0 (mm)	d2 (mm)	a (mm)	D (mm)	π	n (rpm)
80	30	28,6	0,7	29,3	3,14	870
80	40	38,6	0,7	39,3	3,14	648
80	50	48,6	0,7	49,3	3,14	517

Dari hasil tersebut nilai putaran dan kecepatan pemotongan dimasukkan ke dalam menu *initial condition*, kemudian dipilih *velocity* untuk kecepatan pemakanan yang harus diubah dulu satuannya dari m/menit menjadi mm/s pada pahat dan *angular velocity* untuk putaran benda kerja.

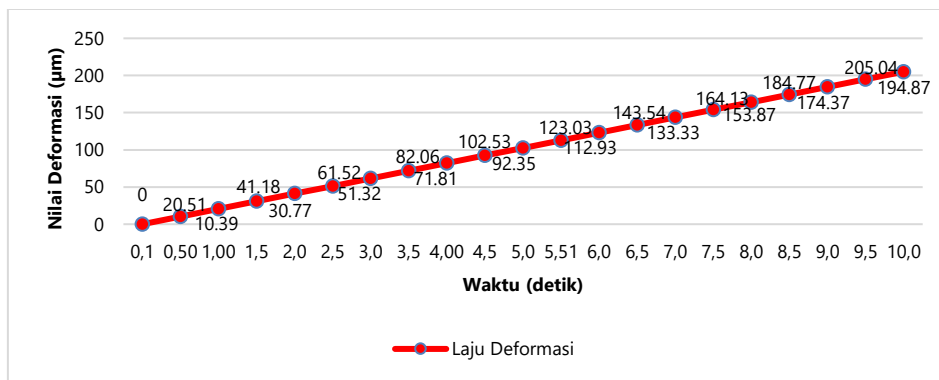
- e) Pergerakan simulasi. Parameter yang selanjutnya diatur adalah pergerakan benda kerja dan pahat. Untuk memasukkan parameter perintah gerakan dapat dipilih pada menu *explicit dynamics*. Parameter pergerakan benda kerja menggunakan menu *remote displacement* dengan acuan sistem koordinat bertipe *cylindrical* yang sebelumnya sudah diatur, untuk parameter yang dimasukkan adalah bagian *axis Y* sebesar 1080°. Selanjutnya untuk pergerakan komponen pahat dipilih menu *displacement* untuk targetnya pada semua sisi pahat dan mengacu pada sistem koordinat bertipe *cartesian* yang sudah diatur sebelumnya. Parameter yang diatur pada pahat adalah *axis* sebesar 205 mm.
- f) Parameter selanjutnya yang harus diatur adalah menu *Solution*. Pada menu ini kita mengatur hasil apa yang kita harapkan dari simulasi ini, untuk itu yang dimasukkan dalam menu ini adalah *deformation probe* dan *strain probe*.

6. Simulasi. Tahapan berikutnya adalah simulasi yaitu dengan memilih menu *solve* dan menunggu sampai proses selesai. Jika proses simulasi berhasil maka tidak akan ada peringatan error, jika terjadi kegagalan maka harus ditinjau ulang pada tahapan *setting* parameter.
7. Tahap selesai. Setelah proses simulasi berhasil maka tahapan proses simulasi selesai dan siap untuk diambil datanya.

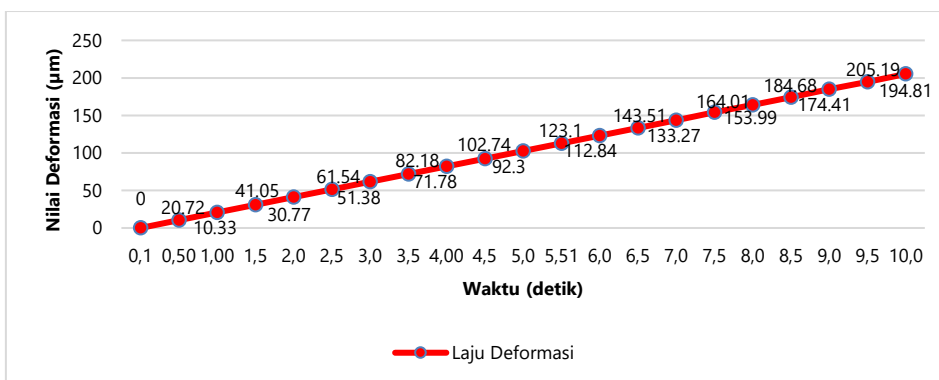
3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1 Hasil Penelitian

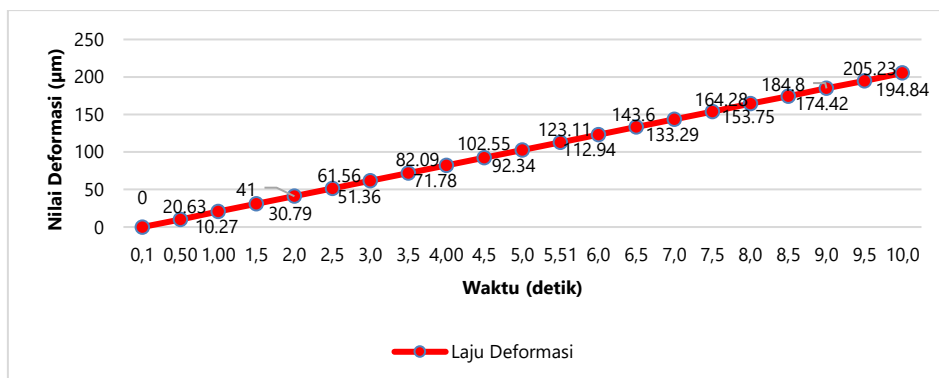
Hasil simulasi total deformasi ditunjukkan pada Gambar 4 sampai dengan 6 berikut ini.



Gambar 4. Grafik Deformasi pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 30 mm

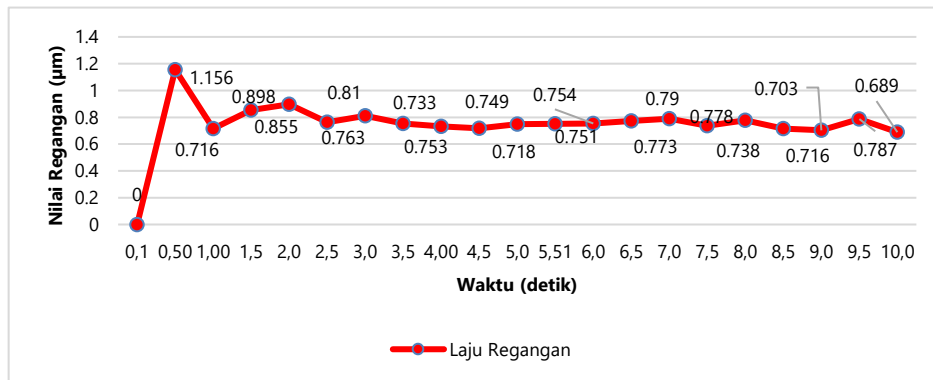


Gambar 5. Grafik Deformasi pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 40 mm

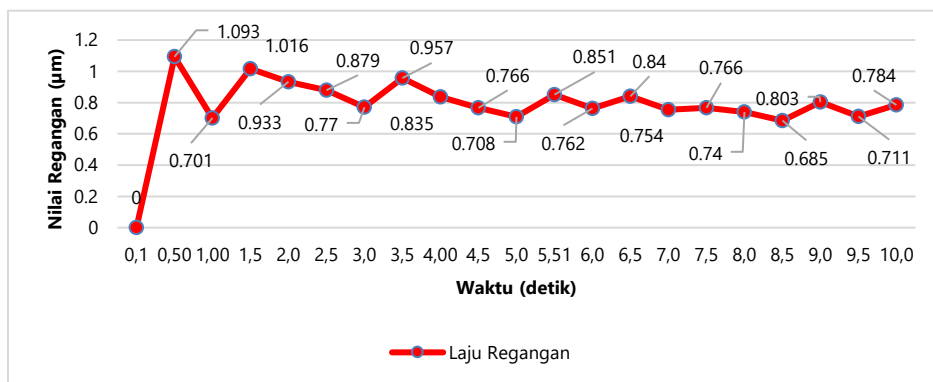


Gambar 6. Grafik Deformasi pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 50 mm

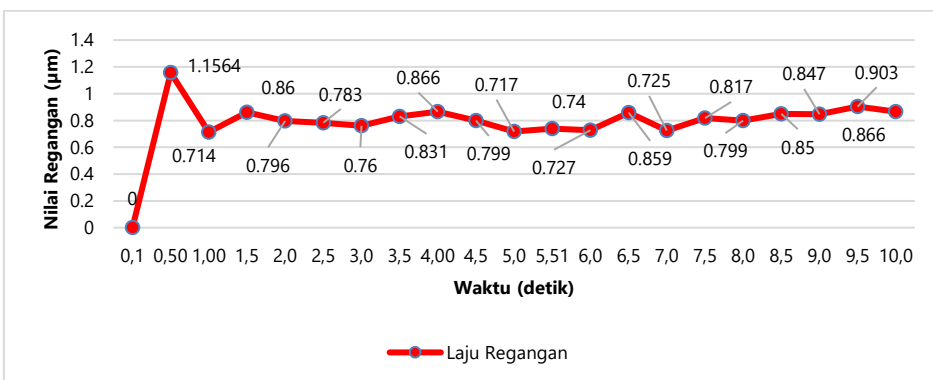
Hasil simulasi total deformasi ditunjukkan pada Gambar 7 sampai dengan 9 berikut ini.



Gambar 7. Grafik Regangan pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 30 mm



Gambar 8. Grafik Regangan pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 40 mm



Gambar 9. Grafik Regangan pada Pahat dengan Benda Kerja \varnothing 50 mm

3.2 Pembahasan

3.2.1 Total Deformasi

Total deformasi pada baja ST42 yang terjadi pada benda kerja baik yang berdiameter 30 mm, 40 mm, maupun 50 mm jika dilihat dari grafik yang ada cenderung terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu proses pembubutan. Hal ini disebabkan besar temperatur berbanding lurus dengan bertambahnya waktu proses pembubutan. Pada simulasi pembubutan ketiga benda kerja nilai deformasi paling kecil adalah 0 mm, peristiwa ini terjadi sebelum pahat menyentuh benda kerja dan mencapai titik tertinggi dengan waktu langkah 10^{-5} detik. Struktur internal benda kerja yang kemungkinan tidak stabil dan pahat yang belum mencapai suhu yang stabil. Setelah melewati tahap

tersebut kenaikan nilai deformasi cenderung lebih signifikan namun stabil. Sedangkan untuk deformasi maksimal masing-masing benda kerja berbeda nilainya. Pada benda kerja $\varnothing 30 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ mencapai deformasi maksimal pada $205,04 \text{ }\mu\text{m}$, pada benda kerja $\varnothing 40 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ deformasi totalnya sebesar $205,19 \text{ }\mu\text{m}$, sedangkan pada benda kerja $\varnothing 50 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ memiliki total deformasi sebesar $205,23 \text{ }\mu\text{m}$.

Dengan melihat nilai deformasi akhir dari masing-masing diameter maka dapat disimpulkan bahwa perbedaan diameter benda kerja dapat mempengaruhi besarnya nilai deformasi yang dialami oleh pahat. Semakin besar diameter benda kerja akan memperbesar pula nilai deformasi pahat. Jika dikaitkan dengan penelitian Skowronek dan Grajcar [10], hal ini terjadi karena semakin besar diameter semakin berat pula kerja yang dilakukan oleh pahat hal ini mengakibatkan suhu yang dialami oleh pahat akan semakin tinggi. Selaras dengan jurnal tersebut yang menyimpulkan semakin tinggi suhu yang dialami maka deformasinya akan semakin tinggi juga.

3.2.2 Regangan Elastik Geser Maksimal

Pada setiap simulasi nilai regangan elastik diawali dengan 0 mm/mm hal ini menunjukkan saat pahat belum bersinggungan dengan benda kerja. Nilai regangan elastik akan naik dengan signifikan saat benda kerja pertama kali bersinggungan dengan pahat. Untuk benda kerja $\varnothing 30 \text{ mm}$ mencapai nilai regangan elastik maksimal pada step waktu $0,5 \times 10^{-5}$ detik dengan nilai $1,1562 \text{ }\mu\text{m}$. Untuk benda kerja $\varnothing 40 \text{ mm}$ mencapai titik regangan elastik maksimal pada step waktu $0,5 \times 10^{-5}$ detik dengan nilai $1,093 \text{ }\mu\text{m}$. Sedangkan pada benda kerja $\varnothing 50 \text{ mm}$ mencapai regangan elastik maksimal sebesar $1,1564 \text{ }\mu\text{m}$ pada *step time* $0,5 \times 10^{-5}$ detik.

Dapat dilihat ketika pahat mulai menyentuh benda kerja maka regangan elastisnya cenderung tinggi namun setelah sekian waktu regangan elastisnya cenderung menurun atau melandai. Hal ini dikarenakan saat pertama kali pahat menyentuh benda kerja terjadi kejutan yang mengakibatkan simpangan pada grafik cenderung besar dan semakin stabil seiring berjalannya waktu dan efek kejutannya semakin menurun. Dari ketiga simulasi regangan pahat yang sudah dilakukan dapat dilihat bahwa semakin besar diameter benda kerja, nilai regangannya akan semakin besar. Fenomena ini dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan torsi antara ketiga diameter benda kerja. Torsi merupakan hasil perkalian antara gaya dan jarak, semakin besar jarak yang dilalui maka torsinya akan semakin besar. Dalam simulasi ini jarak dapat diwakilkan oleh besar jari-jari dari benda kerja, sehingga semakin besar diameter benda kerja akan mengakibatkan torsi yang ditimbulkan akan semakin besar pula. Torsi yang semakin besar akan mengakibatkan besar regangan yang dialami oleh pahat semakin besar.

4. Kesimpulan

- Nilai deformasi yang terjadi pada pahat HSS dalam proses pembubutan benda kerja ST42 $\varnothing 30 \text{ mm}$ adalah $205,04 \text{ }\mu\text{m}$, untuk pahat HSS yang membubut benda kerja $\varnothing 40 \text{ mm}$ mengalami deformasi sebesar $205,19 \text{ }\mu\text{m}$ dan untuk pahat HSS yang membubut benda kerja ST42 $\varnothing 50 \text{ mm}$ mengalami deformasi sebesar $205,23 \text{ }\mu\text{m}$.
- Nilai regangan pada ketiga benda kerja berbahan ST42 dengan pahat HSS dapat disimulasikan menggunakan aplikasi ANSYS. Tipe atau fitur pada aplikasi ANSYS yang digunakan adalah ANSYS *explicit dynamics*, hal ini dikarenakan komponen benda kerja dan pahat akan disimulasikan bergerak. Untuk parameter yang diatur untuk bisa menjalankan simulasi adalah sistem koordinat, koneksi pahat dan benda kerja, *meshing*, dan pergerakan komponen. Dari simulasi tersebut didapatkan hasil besar regangan tertinggi pada pahat HSS yang membubut benda kerja ST42 $\varnothing 30 \text{ mm}$ sebesar $1,156 \text{ }\mu\text{m}$ pada waktu langkah $5,0367 \times 10^{-6}$ detik, dan nilai regangan akhirnya sebesar $0,68993 \text{ }\mu\text{m}$ pada waktu langkah $1,0 \times 10^{-4}$ detik. Untuk pahat HSS yang disimulasikan membubut benda kerja $\varnothing 40 \text{ mm}$ mengalami regangan maksimal sebesar $1,093 \text{ }\mu\text{m}$ pada waktu langkah $5,00 \times 10^{-6}$ detik dengan regangan akhirnya sebesar $0,7839 \text{ }\mu\text{m}$ pada waktu langkah $1,0 \times 10^{-4}$ detik. Kemudian untuk pahat HSS yang membubut benda kerja ST42 $\varnothing 50 \text{ mm}$ mengalami regangan maksimal sebesar $1,156 \text{ }\mu\text{m}$

pada waktu langkah $5,068 \times 10^{-6}$ detik dengan nilai regangan akhirnya sebesar $0,866 \mu\text{m}$ pada waktu langkah $1,0 \times 10^{-4}$ detik.

5. Daftar Pustaka

- [1] N. W. E. Saputro and A. S. Nurrohkeyati, "Analisa Keausan Pahat HSS dan Karbida terhadap Pembubutan Baja ST 37 Di PT.X," *Prosiding Seminar Unimus*, vol. 4, no. 1, pp. 139–149, 2021.
- [2] S. P. Patil and D. M. Tilekar, "Tool Wear Detection of Cutting Tool using Matlab Software," *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, vol. 2, no. 11, pp. 362–366, 2014.
- [3] F. Fahrizal and E. Suprpto, "Optimasi Parameter Pemesinan untuk Minimasi Keausan Pahat pada Pembubutan Baja Karbon Rendah," *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 10, no. 1, pp. 10–19, 2022, doi: 10.23887/jptm.v10i1.41418.
- [4] S. Mujiarto and A. Kusairi, "Analisis Keausan Pahat Potong Karbida Ditinjau dari Perubahan Gaya Pemotongan dengan Pengamatan Daya Motor pada Mesin Bubut CNC Emco Turn 242," *POLHASAINS: Jurnal Sains dan Terapan Politeknik Hasnur*, vol. 3, no. 1, pp. 111–121, 2014.
- [5] S. Lubis, S. Darmawan, Rosehan, and T. Tanuwijaya, "Analisa Pertumbuhan Keausan Pahat Karbida Coated dan Uncoated Pada Alloy Steel AISI 4340," *Jurnal Energi dan Manufaktur*, vol. 9, no. 2, pp. 114–118, 2016.
- [6] Ardyan, Erwansyah, and Y. F. Arriyani, "Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Potong dan Kedalaman Pemotongan terhadap Kekasaran Permukaan Benda Kerja Hasil Pembubutan Material Baja ST 41 menggunakan Pahat HSS," *SJoME*, vol. 3, no. 1, pp. 65–72, 2021.
- [7] S. P. F. Dewangga, I. N. P. Nugraha, and K. R. Dantes, "Pengaruh Variasi Kecepatan Putaran Mesin Bubut terhadap Keausan pada Alat Potong Pahat HSS Tipe Bohler MO 1/2x4," *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.23887/jptm.v5i1.9238.
- [8] Sudjatmiko, A. Suprpto, and Darto, "Karakteristik Keausan dan Umur Pahat HSS Hasil Quenching Melalui Pendinginan Nitrogen pada Proses Pembubutan Al-T-6061," *Jurnal Mechanical*, vol. 4, no. 2, pp. 22–31, 2013.
- [9] J. Sui, R. Kountanya, and C. Guo, "Development of a Mechanistic Force Model for CNC Drilling Process Simulation," *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 787–797, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.064.
- [10] A. Skowronek and A. Grajcar, "Effect of Deformation Temperature on the Mechanical Behavior and Stability of Retained Austenite in TRIP-Assisted Medium-C Multiphase Steel," *Materials*, vol. 13, no. 11, p. 2433, 2020, doi: 10.3390/ma13112433.