Rika Dwi Hidayatul Qoryah

Dosen
Universitas Jember
Jurusan Teknik Mesin
rika.teknik@unej.ac.id

Herninda Ayu Meylinda Sari

Mahasiswa
Universitas Jember
Jurusan Teknik Mesin
herninda.mey22@gmail.com

Mahros Darsin

Dosen
Universitas Jember
Jurusan Teknik Mesin
mahros.teknik@unej.ac.id

Santoso Mulyadi

Dosen
Universitas Jember
Jurusan Teknik Mesin
santoso.teknik@unej.ac.id

SIMULASI GAYA PEMOTONGAN PADA PROSES BUBUT DENGAN SOFTWARE THIRD WAVE ADVANTEDGE

The cutting force that reacts to cutting tool and workpieces will result deflection. Deflection is the cause of product deviation and vibration sources that can shorten the life of the cutting tool. Simulation of machining process is carried out to get an estimate of cutting force in some machining process conditions., then compare it to the experiments. The research aims to find out the influence of spindle rotary speed, feed rate and depth of cut on cutting forces in turning process with cutting tool HSS and workpiece Al 6061. This research uses three-dimensional simulation method using Third Wave AdvantEdge software. Following by comparison between the simulation with the experiments results. The simulation was in accordance to the experiments in term of the magnitude of the forces, from the biggest they are tangential, axial, and radial force respectively. Cutting force will decrease with increased spindle turning speed. Cutting force will increase with the rising feed rate and depth of cut. However, the simulation still highly deviate from the experiments at the rate of 71%, 44.3%, and 21.3% for axial, radial and tangential forces respectively. The possible cause of these high errors relates to forces measuring method in experiments.

Keywords: Cutting Force, Simulation, HSS, Al 6061

1. PENDAHULUAN

Proses pembubutan merupakan salah satu proses pemesinan yang memiliki peranan penting dalam dunia manufaktur. Pada saat proses pembubutan, material yang terpotong akan menghasilkan gaya potong. Besar gaya potong dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya kecepatan potong, kedalaman potong, laju pemakanan, geometri alat potong, jenis material benda kerja dan cara pendinginan benda kerja [1]. Data statistik menunjukkan 15% kerusakan alat disebabkan oleh pemilihan parameter pemotongan yang salah. Pemilihan bahan pahat dan parameter pemotongan mempengaruhi tegangan kritis. Keadaan tekanan pada alat pemotong akan mempengaruhi kegagalan alat [2].

Gaya potong (*cutting force*) yang dihasilkan pada proses pembubutan ada tiga macam, yaitu gaya tangensial, gaya aksial, dan gaya radial. Gaya tangensial yaitu gaya yang dihasilkan pada arah kecepatan potong. Gaya aksial yaitu gaya yang terjadi pada arah gerak makan. Gaya radial yaitu gaya yang arahnya menuju bidang normal pada kecepatan potong [3]. Gaya potong yang bereaksi pada pahat dan benda kerja, yang selanjutnya diteruskan pada bagian-bagian tertentu mesin perkakas, akan mengakibatkan lenturan. Lenturan menjadi penyebab kesalahan geometri produk maupun sumber getaran yang dapat memperpendek umur pahat. Untuk itu, perlu mengetahui besarnya gaya potong setiap proses permesinan pada kondisi tertentu, sehingga perlu dilakukan simulasi proses permesinan [4]. Salah satu upaya merancang besaran gaya potong yang bekerja pada permesinan adalah dengan simulasi.

Berbagai penelitian sebelumnya telah memodelkan gaya yang bekerja pada pemesinan. Rusnaldi [4] melakukan penelitian tentang simulasi gaya potong dengan software DEFORM 2D. Besar kecilnya nilai gaya potong dapat dipengaruhi oleh kecepatan potong, laju pemakanan, kedalaman potong, radius pahat, sudut potong (*rake angle*) pahat. Parihar dkk [2] telah melakukan pemodelan simulasi proses bubut AISI H13

menggunakan *software* DEFORM 3D dengan pengaruh dari parameter kedalaman potong, kecepatan potong, dan laju pemakanan. Hasil yang diperoleh yaitu tegangan maksimum terdapat pada sudut mata potong sisi (*secondary cutting edge*). Selain *software* DEFORM, ada perangkat lunak lain yang dapat digunakan untuk mensimulasi proses permesinan, seperti *Third Wave AdvantEdge*. *Third Wave AdvantEdge* digunakan oleh Dali dkk [5] dalam memodelkan pahat bubut untuk pembuatan struktur dengan cekungan kecil. Hasilnya, *software* ini cukup signifikan mengurangi jumlah eksperimen dengan hasil yang dapat menjangkau semua kondisi pemotongan. Han dan Wu [6] menggunakan *software* ini untuk mensimulasikan proses *drilling* dua material (Titanium 64 dan 45 steel) dan membandingkan dengan hasil eksperimen dalam hal *torque* dan suhu proses. Hasilnya, tidak jauh berbeda hasil simulasi dari eksperimen.

Berdasarkan kajian di atas, peneliti akan melakukan pengujian gaya pemotongan dengan *software Third Wave AdvantEdge* menggunakan metode elemen hingga. *Third Wave AdvantEdge* merupakan *software* berbasis FEM untuk memodelkan proses pemessinan dalam dua dimensi maupun tiga dimensi. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan putar spindle, laju pemakanan dan kedalaman potong terhadap gaya pemotongan pada proses bubut dengan pahat HSS dan benda kerja Al 6061. Hasil pemodelan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya oleh A'liyah [7], Muhklisin dkk[8], dan Siregar dkk.[9].

2. METODE PENELITIAN

Software Third Wave AdvantEdge digunakan untuk menunjukkan pemodelan elemen hingga dalam bentuk 3D model. Simulasi pada proses bubut dititik beratkan pada gaya pemotongan yakni gaya axial (*feed force, Ff*), gaya radial (*passive force, Fp*), dan gaya potong (*tangential force, Fc*) yang dihasilkan antara pahat dan benda kerja. Material benda kerja yaitu Al 6061 dan material pahat yaitu HSS. Parameter pemotongan yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi parameter pemotongan

KODE	PARAMETER	LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
A	Kecepatan putar spindle (r/min)	140	215	330
B	Laju pemakanan (mm/r)	0,043	0,065	0,087
C	Kedalaman potong (mm)	0,2	0,4	0,6

Prosedur simulasi yang dilakukan untuk analisis gaya pemotongan proses bubut dengan *software Third Wave AdvantEdge* ditunjukkan pada Gambar 1. Prosedur simulasi dimulai dengan pemilihan *project* yaitu *turning process 3D Simulation*. Selanjutnya, dilakukan pemodelan pahat dan benda kerja. Untuk menyederhanakan model, benda kerja dimodelkan sebagai sebuah bidang datar. Hal serupa dilakukan oleh beberpa peneliti sebelumnya [10, 11]. Setelah dilakukan pemodelan, dilanjutkan dengan tahap memilih material pahat dan benda kerja. Pemilihan jenis material berdasarkan opsi yang tersedia pada *software*. Tahap selanjutnya yaitu melakukan input parameter pemotongan kemudian dilanjutkan dengan proses *meshing* dari pemodelan tersebut. Pada pemodelan ini, menggunakan *six-node triangular elements*, elemen ini sebagai pilihan dasar untuk proses penyelesaian *meshing* pada perangkat lunak tersebut. Pada proses *meshing* menggunakan ukuran elemen maksimum 1 mm dan minimum 0,2 mm. Apabila proses *meshing* telah sukses, tahap selanjutnya yaitu melakukan *running* simulasi untuk mendapatkan nilai gaya pemotongan.

Hasil simulasi berupa data ketiga gaya yang bekerja pada pembubutan yang berjumlah ribuan. Kemudian data dipresentasikan dalam bentuk grafik. Data kemudian dirata-rata dengan cara hanya mengambil data ketika keadaan data stabil. Keadaan stabil mengindikasikan bahwa pahat telah sepenuhnya bertemu dengan benda kerja dan pahat belum mengalami aus. Langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil simulasi dengan eksperimen. Error dihitung sebagai representasi sejauh mana perbedaan antar hasil keduanya dengan persamaan (1) sebagaimana yang pernah dipakai oleh Okokpujie dkk [13].

$$Error = \frac{|Hasil\ simulasi - hasil\ eksperimen|}{hasil\ eksperimen} \times 100\% \quad (1)$$

Gambar 1: Prosedur simulasi proses pembubutan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Simulasi Gaya Pemotongan pada Proses Bubut

Penyelesaian simulasi menggunakan metode analisis elemen hingga atau *Finite Element Analysis* (FEA). Metode FEA digunakan untuk membagi (diskrit) bagian struktur menjadi beberapa elemen dengan jumlah titik (*node*) sesuai dengan jenis *meshing* yang diberikan. *Software Third Wave AdvantEdge* menggunakan *six-node triangular elements* secara *default* sebagai proses penyelesaian simulasinya. Simulasi pada proses bubut dititikberatkan pada gaya pemotongan yang dihasilkan antara pahat dan benda kerja. Material benda kerja dan pahat dipilih dari opsi material yang tersedia pada software yaitu Al 6061 dan HSS. Benda kerja dibuat dengan dimensi panjang 5 mm, tinggi 2 mm, dan lebar 1 mm. Gambar 2 menunjukkan hasil *meshing* pada simulasi proses pembubutan.

Gambar 2: *Meshing* proses pembubutan

Output data yang keluar sebanyak puluhan ribu data. Data yang didapat dari simulasi proses pembubutan merupakan data dengan nilai yang fluktuatif namun cenderung stabil. *Output* data diplotkan pada Microsoft Excel, kemudian nilai-nilai tersebut dirata-rata dan dimasukkan ke dalam tabel hasil simulasi. Untuk melakukan analisis simulasi gaya pemotongan diambil nilai rata-rata untuk mewakili nilai pada tabel hasil simulasi. Menurut Darsin dkk [12], gaya dipilih dari kondisi yang paling stabil kemudian nilai gaya pada kondisi tersebut dirata-rata. Kondisi stabil ini menjelaskan bahwa telah terjadi interaksi penuh antara pahat dan benda kerja dalam pembentukan *chip*. Gambar 3 adalah contoh grafik *output* data dari simulasi gaya aksial pada variasi $n = 140$; $f = 0,043$; $a = 0,2$. Gambar 3 juga memberikan ilustrasi bagaimana mereduksi data dengan mengambil data hanya ketika kondisi stabil saja. Data dari sampai dengan waktu $\pm 0,003$ s tidak akan ikut dirata-ratakan, karena dianggap belum stabil.

Gambar 3: Contoh grafik *output* data dari simulasi gaya aksial pada variasi $n = 140$; $f = 0,043$; $a = 0,2$

3.2 Analisis Gaya Pemotongan

Gaya pemotongan berpengaruh terhadap proses pemotongan. Gaya yang terjadi dalam proses pemotongan logam memberikan informasi mengenai kebutuhan daya mesin, pemilihan proses pemotongan dan parameter yang tepat, sehingga menghasilkan penghematan energi selama proses pemesinan [2]. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan uji eksperimental dengan kondisi simulasi pemotongan yang sama. Alat ukur gaya potong yang digunakan pada uji eksperimental yaitu sensor *strain gauge* (*load cell*) yang terhubung dengan pahat. Data hasil eksperimen pada penelitian pengukuran gaya pemotongan proses bubut menggunakan sensor *strain gauge* dapat dilihat pada Tabel 2. Data tersebut diperoleh dari hasil eksperimen gaya tangensial (F_c) [7], gaya radial (F_p) [8], dan gaya aksial (F_f) [9]. Berikut ini adalah salah satu contoh perhitungan error pada variasi 1. Selanjutnya hasil perhitungan ketiga jenis gaya pada semua variasi dirangkum sebagaimana tersaji pada Tabel 2.

$$Error = \frac{|\text{Hasil simulasi} - \text{hasil eksperimen}|}{\text{hasil eksperimen}} \times 100\%$$

$$Error (F_f) = \frac{|37,09 - 110,44|}{110,44} \times 100\% \\ = \frac{73,35}{110,44} \times 100\% = 66\%$$

$$Error (F_p) = \frac{|21,75 - 38,55|}{38,55} \times 100\% \\ = \frac{16,8}{38,55} \times 100\% = 44\%$$

$$Error (F_c) = \frac{|61,02 - 54,66|}{54,66} \times 100\% \\ = \frac{6,36}{54,66} \times 100\% = 12\%$$

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimental gaya pemotongan

Variasi	Parameter Pemotongan			Eksperimen			Simulasi			Error		
	Kecepatan putar spindle (r/min)	Laju Pemakanan (mm/r)	Kedalaman Potong (mm)	F_f (N)	F_p (N)	F_c (N)	F_f (N)	F_p (N)	F_c (N)	F_f (%)	F_p (%)	F_c (%)
1.	140	0.043	0.2	110,44	38,55	54,66	37,09	21,75	61,02	66	44	12
2.	140	0.065	0.4	78,35	29,71	56,35	51,42	26,47	73,11	34	11	30
3.	140	0.087	0.6	95,07	35,76	89,73	62,76	27,67	100,81	34	23	12
4.	215	0.043	0.4	222,41	54,23	54,09	14,66	19,58	51,48	93	64	5
5.	215	0.065	0.6	262,91	53,25	80,38	34,02	29,31	77,29	87	45	4
6.	215	0.087	0.2	324,55	40,62	34,06	24,39	25,70	43,67	92	37	28
7.	330	0.043	0.6	126,51	12,04	59,2	23,46	19,37	44,26	81	61	25
8.	330	0.065	0.2	72,40	6,244	24,21	16,63	9,89	30,08	77	58	24
9.	330	0.087	0.4	104,32	9,145	39,96	26,44	14,30	60,87	75	56	52

Gambar 4 menunjukkan grafik perbedaan nilai dari hasil simulasi dan uji eksperimental gaya pemotongan. Gambar 4(a) - 4(c) tersebut menunjukkan perbedaan *trendline* peningkatan serta penurunan gaya pemotongan pada setiap variasi. Perbedaan nilai terjadi mungkin disebabkan oleh keterbatasan kondisi komputasi pada saat dilakukan simulasi. Keterbatasan komputasi yang dimaksudkan adalah jumlah diskrit elemen yang kurang mewakili pada saat dilakukan simulasi.

(a) Gaya aksial; (b) Gaya radial; (c) Gaya Tangensial; (d), (e), (f) Grafik linearitas hasil uji sensitivitas alat untuk masing-masing gaya

Gambar 4: Grafik perbandingan hasil simulasi dan eksperimental gaya pemotongan

Kemungkinan lain penyebab besarnya perbedaan hasil simulasi terhadap eksperimen bersumber dari data eksperimen. Alat ukur gaya yang digunakan pada eksperimen adalah *strain gage* yang masih dalam tahap

pengembangan. Pengujian terhadap alat ukur didapatkan bahwa sensitivitasnya kurang baik, pergeseran titik nol (*gain* dan *offset*) pada rangkaian sistem akuisisi data mengakibatkan rentang hasil pengukuran berubah-ubah; seperti dinyatakan dalam laporan penelitian tersebut. Hasil pengujian alat dikutip dan disajikan pada Gambar 4(d) – 4(f). Idealnya hasil eksperimen pengujian sensitivitas berimpit dengan garis linier. Gambar 4(d) menyimpang paling besar dari garis linier. Inilah salah satu penyebab hasil simulasi juga menghasilkan error terbesar (71%) pada Gambar 4(a). Sedangkan Gambar 4(f) menunjukkan dua garis paling berimpit daripada Gambar 4(d) dan 4(e). Sehingga diperoleh error hasil simulasi terhadap eksperimen paling kecil sekitar 21,3% [Gambar 4(c)].

Satu hal penting yang perlu dicatat dari hasil simulasi ini adalah bahwa urutan distribusi besarnya masing-masing gaya sudah sesuai dengan teori, yaitu gaya tangensial memiliki nilai yang paling tinggi, kemudian diikuti nilai gaya radial dan gaya aksial.

3.3 Analisis Pengaruh Parameter

Untuk melakukan analisis respon pengaruh parameter terhadap gaya pemotongan, diambil nilai rata-rata hasil simulasi gaya pemotongan pada setiap level. Masing-masing parameter untuk mewakili nilai yang disajikan pada Tabel 3. Kemudian data tersebut diplotkan menjadi grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 3. Respon rata-rata gaya pemotongan setiap level parameter

Kode.	Parameter	Respon rata-rata F_t			Respon rata-rata F_p			Respon rata-rata F_c		
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3
A	Kecepatan putar spindle (r/min)	50,42	24,36	22,18	25,29	24,86	14,52	78,31	57,48	45,07
B	Laju pemakanan (mm/r)	25,07	34,02	37,86	20,23	21,89	22,56	52,25	60,16	68,45
C	Kedalaman potong (mm)	26,04	30,84	40,08	19,11	20,12	25,45	44,92	61,82	74,12
Rata-rata		32,32			21,56			60,29		

Berdasarkan hasil rata-rata nilai gaya pemotongan pada Tabel 3 dapat diketahui bahwa gaya tangensial memiliki nilai rata-rata tertinggi, kemudian diikuti gaya aksial dan gaya radial. Nilai rata-rata gaya tangensial, aksial, dan radial masing-masing adalah 60,29 N; 32,32 N dan 21,56 N.

Gambar 5: Respon gaya pemotongan pada setiap parameter

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa dengan meningkatnya putaran spindle mengakibatkan nilai gaya pemotongan turun, sedangkan dengan meningkatnya laju pemakanan dan kedalaman potong menyebabkan nilai gaya pemotongan naik. Gaya potong semakin menurun dikarenakan tegangan geser antara pahat dengan benda kerja mengecil [14]. Kecilnya tegangan geser karena terjadi *thermal softening* pada benda kerja [15].

Logam pada umumnya memiliki sifat ulet (*ductile*) apabila mendapat tekanan, sehingga menimbulkan tegangan di daerah sekitar konsentrasi gaya penekanan mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja (logam) memiliki orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan terjadi tegangan geser yang maksimum [16]. Tegangan geser yang melebihi kekuatan logam akan menyebabkan terjadi deformasi plastis pada benda kerja di ujung pahat, sehingga terbentuk tatal pemotongan.

Gambar 6 menunjukkan area pahat yang mengalami tegangan maksimum terletak pada area nose radius dengan nilai sebesar 266,667 MPa. Dapat dilihat pada Gambar 6 bahwa dengan meningkatnya kecepatan putar spindle, luasan area yang mengalami tegangan maksimum menjadi semakin kecil. Hasil yang diperoleh sesuai penelitian sebelumnya oleh Gunay [17] berkurangnya nilai tegangan dapat dikaitkan dengan semakin mudah geram terbentuk, karena koefisien gesekan yang menurun pada permukaan geram dan pahat. Hal tersebut mengakibatkan gaya potong menurun.

Gambar 6 : Tegangan pada pahat dengan laju pemakanan 0,043 mm/r

Gambar 7 menunjukkan tegangan maksimum yang terjadi pada putaran spindle 140 rpm dengan peningkatan laju pemakanan. Nilai tegangan maksimum pada laju pemakanan 0,043 mm/r adalah sebesar 266,667 MPa. Pada laju pemakanan 0,065 mm/r dan 0,087 mm/r memiliki nilai tegangan maksimum yang sama 533,333 MPa, namun memiliki luasan tegangan maksimum yang berbeda. Luasan area tegangan maksimum pada laju pemakanan 0,087 mm/r lebih besar daripada laju pemakanan 0,065 mm/r. Peningkatan laju pemakanan menyebabkan nilai tegangan juga meningkat [17]. Pergeseran pahat akan bertambah per putaran spindle karena laju pemakanan meningkat. Hal tersebut akan berpengaruh terhadap peningkatan kekasaran permukaan [18]. Semakin kasar permukaan benda, maka tingkat keausan pahat semakin besar [19]. Peningkatan keausan tepi pahat akan berdampak pada peningkatan gaya potong yang terjadi [20].

Gambar 7: Tegangan pada pahat dengan putaran spindle 140 rpm

Kenaikan laju pemakanan dan kedalaman potong dapat mempengaruhi konsumsi daya, karena peningkatan laju pemakanan dan kedalaman potong dapat meningkatkan gaya pemotongan saat kecepatan konstan. Apabila gaya pemotongan besar maka membutuhkan daya potong yang besar.

4. KESIMPULAN

- a. Gaya pemotongan yang dihasilkan pada simulasi proses bubut dengan benda kerja Al-6061 dan pahat HSS adalah gaya aksial memiliki nilai rata-rata tertinggi, kemudian diikuti gaya tangensial dan gaya radial. Nilai rata-rata gaya tangensial, aksial, dan radial masing-masing adalah 60,29 N; 32,32 N dan 21,56 N.
- b. Pengaruh parameter pemesinan terhadap gaya pemotongan adalah kecepatan putar spindle menyebabkan nilai gaya pemotongan menurun. Sedangkan dengan peningkatan laju pemakanan dan kedalaman potong menyebabkan gaya pemotongan akan meningkat. Namun jika dibandingkan dengan hasil eksperimen, terjadi *error* yang besar. Salah satu penyebab besarnya nilai *error*, karena eksperimen dilakukan dengan alat yang belum standar (masih dalam tahap pengembangan).

5. SARAN

- a. Perlu penelitian lebih lanjut dalam melakukan pemodelan proses bubut untuk menurunkan nilai *error* pada perbandingan simulasi proses bubut.
- b. Perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh kedalaman potong, laju pemakanan, dan kecepatan putar spindle terhadap tingkat keausan pahat dan umur pahat.
- c. Perlu dilakukan penelitian mengenai karakteristik geram dan kekasaran permukaan pada proses pembubutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] KORKUT, I., BOY, M., “Experimental examination of main cutting force and surface roughness depending on cutting parameters”, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, v. 54, n. 7, pp. 531-538, Aug. 2017.
- [2] PARIHAR, R. S., SAHU, R. K., & SRINIVASU, G., “Finite element analysis of cutting forces generated in turning process using deform 3D software”, *Materials Today: Proceedings*, v. 4, n. 8, pp. 8432-8438, 2017.
- [3] SATYANARAYANA, K., GOPAL, A.V., RAO, G.V., “Effect of rake angle and feed rate on cutting forces in an orthogonal turning process”, In: *International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering*, pp.150-154, Jan. 2011.
- [4] RUSNALDY, R., “Proses simulasi untuk menentukan besarnya gaya potong pada proses bubut”, *ROTASI*, v. 11, n. 1, pp. 29-32, 2009.
- [5] DALI, M.N.A.M., GHANI, J.A. AND HARON, C.H.C., “Comparison between dynamic and non-dynamic cutting tool option in FEM simulation for producing dimple structure”, *Procedia CIRP*, v. 58, pp.613-616, 2017.
- [6] HAN, R.D., WU, J. “Finite element simulation of drilling based on third wave systems AdvantEdge”, *Key Engineering Materials*, v. 431-432, pp. 229-232, 2010.
- [7] A’LIYAH, I. F. H., *Analisis gaya potong pada proses bubut dengan menggunakan sensor strain gauge*, Skripsi, Fakultas Teknik Universitas Jember, Jember, 2020.
- [8] MUKHLISIN, M., RAMADHAN, M.E., MULYADI, S., “Analisa gaya radial pada proses turning menggunakan sensor strain gauge”, *Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering*, v. 4, n. 2, Des. 2020.
- [9] SIREGAR, S. A., TRIONO, A., DARSIN, M., MULYADI, S. “Measuring feed force in machining using a strain gage”, *Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering*, v. 16, n. 1, 2021.
- [10] YANG, D., YU, L., FUJIAN, M., ZHIHUA, S., & ZHANG, S. “Simulation study on cutting force and cutting temperature in turning of titanium alloy”, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 692, 012014, Wuhan, Oct. 2019.

- [11] RIBEIRO-CARVALHO, S., HOROVISTIZ, A., DAVIM, J.P. “Material model assessment in Ti6Al4V machining simulations with FEM”, In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 203-210, Feb. 2021.
- [12] DARSIN, M., PASANG, T., & CHEN, Z., “Forces perspective of drillability of titanium alloy 6Al-2Sn-4Zr-6Mo”, *JEMMME (Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering)*, v. 3, n. 1, pp. 23-30, 2018.
- [13] OKOKPUJIE, I.P., IKUMAPAYI, O.M., OKONKWO, U.C., SALAWU, E.Y., AFOLALU, S.A., DIRISU, J.O., NWOKE, O.N. AND AJAYI, O.O., “Experimental and mathematical modeling for prediction of tool wear on the machining of aluminium 6061 alloy by high speed steel tools”, *Open Engineering*, v. 7, n. 1, pp. 461-469, 2017.
- [14] ROSEHAN, LUBIS, S., FIRMANSYAH, M., “Analisis parameter permesinan terhadap gaya potong pada proses pembubutan logam S45C”, In: *Prosiding Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI)*, pp 303-304, Bali, Nov. 2014.
- [15] SIVARAMAN, V., SANKARAN, S., VIJAYARAGHAVAN, L., “The effect of cutting parameters on cutting force during turning multiphase microalloyed steel”, *Procedia CIRP*. v. 4, pp. 157-160, 2012.
- [16] ROCHIM, T., *Klasifikasi Proses, Gaya, Daya Pemesinan*, Bandung, Institut Teknologi Bandung, 2007.
- [17] GÜNAY, M., KORKMAZ, M. E., YAŞAR, N., “Finite element modeling of tool stresses on ceramic tools in hard turning”, *Mechanics*, v. 23, n. 3, pp. 432-440, 2017.
- [18] MUDJIJANTO, M., SUTARTO, E., SARIP, S., “Analisis karakteristik geram dan kekasaran permukaan pada proses bubut kecepatan rendah terhadap baja karbon”, *SIMETRIS*, v. 13, n. 1, pp. 18-23, 2019.
- [19] WIBOLO, A., WAHYUDI, S., SUGIARTO, S. “Optimasi parameter pemotongan mesin bubut cnc terhadap kekasaran permukaan dengan geometri pahat yang dilengkapi chip breaker”. *Rekayasa Mesin*, v. 2, n. 1, pp. 55-63, 2011.
- [20] SOESANTI, A., SOEPANGKAT, B. O. P., PRAMUJATI, B., “Pengaruh cairan pendingin bertekanan tinggi terhadap keausan tepi pahat, gaya potong, dan kekasaran permukaan pada pembubutan baja AISI 4340”, In: *Seminar Nasional Teknik Mesin X Universitas Brawijaya*, Nov. 2011.