



Analisis Lanjutan Distribusi Tegangan Sisa dan Keausan Pahat Milling pada Pemesinan Keras

Roy Lamrun Sianturi¹, *Rogantino Sianturi²

¹ Teknik Mesin Universitas HKBP Nomensen Medan, Medan, Indonesia

² Teknik Mesin Universitas Darma Agung Medan, Medan, Indonesia

*Corresponding author: roylamrunsianturi@gmail.com

<p>Kata Kunci: alat pemotong, keausan alat, distribusi tegangan, digabungkan Eulerian-Lagrangian, FEM</p> <p>Keywords: cutting tools, tool wear, stress distribution, coupled Eulerian-Lagrangian, FEM</p>	<p>Abstract — Milling is an irreplaceable technology for finishing turbo engine components made of nickel-based alloys. The aim of the research is to increase the understanding of the special effects of changes caused by wear and tear on the tool geometry and the residual stress on the stress distribution in the cutting section of the milling tool. This publication presents a method for considering residual cutting tool stress and tool wear in a 2D FEM chip shaping model for a detailed analysis of specific tool failure phenomena in the milling process. To represent the residual stress depth distribution in the uncoated tool surface layer in the simulation, residual stress measurements on the milling tool were carried out. Tool wear is accounted for by adapting the cutting tool geometry. Changes in geometry are based on measurements of the width of the wing wear area and the radius of the cutting edge. Principal stresses and von Mises equivalent stress distributions are analyzed. The methods described can enhance the understanding of the effect of surface coatings on milling tool life. With decreasing chip thickness, one second, a more localized zone of tensile stress forms beneath the rake face, which can be critical in terms of fracture. With compressive residual stresses and with increasing flange wear, these critical tensile stresses are reduced or even eliminated.</p> <p>Abstrak— Penggilingan adalah teknologi yang tak tergantikan untuk menyelesaikan komponen mesin turbo yang terbuat dari paduan berbasis nikel. Tujuan penelitian yaitu untuk meningkatkan pemahaman tentang efek khusus dari perubahan yang disebabkan oleh keausan pada geometri pahat serta tegangan sisa pada distribusi tegangan pada irisan pemotongan pahat milling. Publikasi ini menyajikan metode untuk mempertimbangkan tegangan sisa pahat potong dan keausan pahat dalam model pembentukan chip FEM 2D untuk analisis terperinci fenomena kegagalan pahat tertentu dalam proses penggilingan. Untuk mewakili distribusi kedalaman tegangan sisa pada lapisan permukaan pahat yang tidak dilapisi dalam simulasi, pengukuran tegangan sisa pada pahat penggilingan dilakukan. Keausan pahat diperhitungkan dengan mengadaptasi geometri pahat potong. Perubahan geometri didasarkan pada pengukuran lebar lahan keausan sayap dan radius cutting edge. Tegangan utama dan distribusi tegangan setara von Mises dianalisis. Metode yang dijelaskan dapat meningkatkan pemahaman tentang efek lapisan permukaan pada umur pahat pahat milling. Dengan penurunan ketebalan chip, satu detik, zona tegangan tarik yang lebih terlokalisasi terbentuk di bawah permukaan rake face, yang dapat menjadi kritis dalam hal patahan. Dengan tegangan sisa tekan dan dengan peningkatan keausan sayap, tegangan tarik kritis ini berkurang atau bahkan dihilangkan.</p>
--	---

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License.



1 PENDAHULUAN

Bahan tahan suhu tinggi seperti paduan berbasis nikel menggabungkan beberapa sifat

positif yang menjadikannya kelas bahan pilihan untuk digunakan dalam mesin pesawat terbang. Sifat-sifat positif tersebut antara lain kekuatan

mekanik yang tinggi pada suhu yang meningkat, ketahanan kimiawi yang berbeda serta ketahanan aus yang tinggi. Penggilingan paduan seperti Inconel 718 tetap menantang meskipun penelitian ekstensif. Kekuatan mekanik yang relatif tinggi dikombinasikan dengan konduktivitas termal yang rendah menghasilkan beban pahat termomekanis yang jelas dan akibatnya pada keausan pahat yang cepat dan ekstensif. Fenomena kegagalan dan keausan yang khas adalah keausan perekat dan abrasif, fraktur, dan chipping [1]. Dalam penggilingan akhir paduan berbasis nikel, pabrik akhir karbida padat yang tidak dilapisi banyak digunakan karena banyak pelapis menunjukkan kegagalan pelapisan spontan [2]. Namun, Barthelmä et al. mengidentifikasi potensi sistem coating berbasis AlTiCrN dengan kombinasi gradien dan struktur multilayer untuk meningkatkan tool life sebesar 40% saat milling Inconel 718 [3]. Selain meningkatkan kekuatan lapisan dan daya rekat lapisan, penelitian berfokus pada peningkatan bahan alat [4] atau geometri ujung tombak [3, 5, 6]. Untuk memenuhi persyaratan produksi yang akan datang, perhatian khusus harus diberikan pada sifat-sifat alat potong yang dikombinasikan dengan parameter proses [3]. Makalah yang disajikan berkontribusi pada tren ini dengan menyediakan metode baru untuk analisis sifat dekat permukaan alat penggilingan yang tidak dilapisi.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Perhitungan distribusi tegangan berbasis FEM pada alat potong

Tegangan sisa yang dipertimbangkan dalam model FE didasarkan pada pengukuran tegangan sisa pada alat penggilingan yang tidak dilapisi (diameter $d = 10$ mm, jumlah gigi $z = 4$, sudut heliks = 30°). Bahan alat adalah butiran submikron cemented carbide dengan ukuran butiran $0,5 - 0,8 \mu\text{m}$ dan kandungan kobalt 7,5%. Perkakas diproduksi menggunakan mesin gerinda perkakas 5 sumbu Walter Helitronic Vision 400. Pengukuran regangan kisi dilakukan pada flank dan rake face menggunakan X-ray diffraction (XRD) dalam tiga arah. Pengukuran regangan kisi dilakukan pada mobile goniometer (Stresstech XSTRESS 3000 G2R) dalam geometri Ψ dengan kolimator berdiameter 1 mm, dan data dievaluasi dengan metode. Komponen tegangan yang dievaluasi dengan menggunakan \sin^2 adalah tegangan biaxial $\sigma_\phi=0$ (sejajar dengan ujung

potong) dan $\sigma_\phi=90$ (tegak lurus dengan ujung potong), serta tegangan $\sigma_\phi=45$. Karena densitas semen karbida ($14,5 \text{ g/cm}^3$) dan penyerapan radiasi yang dihasilkan, kedalaman penetrasi dibatasi hingga $1,6 \mu\text{m}$, Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pengukuran tegangan sisa

Parameter	M1	M2
Radiasi	Cr-K α (29 kV)	Cu-K α (29 kV)
Bidang kisi {hkl}	{102}	{301}
Sudut difraksi $2\theta / ^\circ$	135.8	146.3
Jumlah kemiringan	15	13
Kedalaman penetrasi rata-rata μm	0.67	1.6

Tabel 2. Hasil pengukuran tegangan sisa

Posisi di alat	$\tau=0.67 \mu\text{m}$	$\tau=1.6 \mu\text{m}$
Rake face $\sigma_\phi=0$ / MPa	-2340	-2230
Rake face $\sigma_\phi=90$ / MPa	-3763	-3040
Flank face $\sigma_\phi=0$ / MPa	-3315	-2757
Flank face $\sigma_\phi=90$ / MPa	-2287	-2074

2.2 Detail pendekatan pemodelan benda kerja

Penelitian ini menggunakan elemen Euler tipe EC3D8RT untuk memodelkan domain benda kerja. EC3D8RT memungkinkan multimaterial dalam satu elemen dan memungkinkan analisis termomekanis. Ukuran elemen minimum adalah $0,002$ mm. Bahan awal dalam domain Euler adalah bahan benda kerja Inconel 718 (anil dan berumur).

$$\sigma_{JC} = (A + B \cdot \epsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right) \quad (1)$$

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot \epsilon^{D_3 \cdot \eta}) \cdot \left(1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - D_5 \frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_D = (1 - D_{de}) \cdot \sigma_{JC}, \quad D_{de} = \frac{1 - e^{-\beta \cdot \frac{u_{pl}}{u_{pl,f}}}}{1 - e^{-\beta}} \cdot p \quad (3)$$

Tabel 3. Parameter model Johnson-Cook untuk Inconel 718

A/MPa	B/MPa	n	C	m	$\epsilon_0 / \text{s}^{-1}$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$T_0 / ^\circ\text{C}$
1200	1284	0.54	0.006	1.2	0.001	1340	25

Tabel 4. Parameter model kerusakan Inconel 718

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$\bar{u}_{pl,f}$	p	β
0.451	0.75	-1.45	0.04	0.89	0.01649	0.7	3

2.3 Detail pendekatan pemodelan untuk alat pemotong

Pahat dimodelkan dengan formulasi Lagrangian dengan elemen tipe C3D8R, yang memungkinkan analisis mekanis pahat potong. Ukuran elemen pahat pemotong, khususnya pada lapisan permukaan rake dan flank face, sangat penting untuk mensimulasikan distribusi tegangan secara akurat termasuk tegangan sisa. Dengan demikian, ukuran elemen minimum $0,8 \mu\text{m}$

digunakan pada lapisan permukaan. Di dekat pusat jari-jari ujung tombak, ukuran elemen bervariasi antara 0,2 μm dan 1 μm . Analisis termal dinonaktifkan untuk alat pemotong untuk mengurangi waktu komputasi.

Antarmuka alat-chip antara elemen Lagrangian (alat pemotong) dan elemen Euler (bahan benda kerja) ditentukan oleh interaksi kontak. Interaksi kontak terdiri dari model gesekan tergantung suhu [21] (lihat Persamaan 4) dan formulasi kontak pinalti. Model gesekan ini menunjukkan bahwa koefisien gesekan semu bertahan pada nilai μ_0 hingga suhu $T_{0,r}$ dan kemudian menurun dengan meningkatnya suhu kontak, karena efek pelunakan termal, sehubungan dengan suhu leleh T_m .

$$\mu = \mu_0, \quad T < T_{0,r}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_{0,r}}{T_m - T_{0,r}}\right)^{mr}\right), \quad T \geq T_{0,r}$$

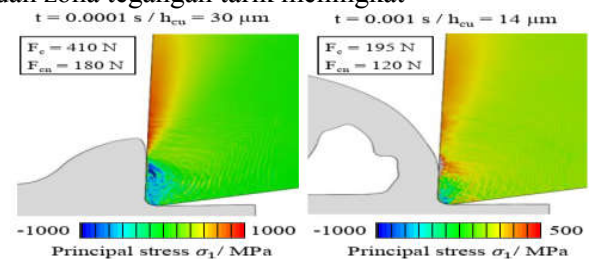
Tabel 5. Parameter model gesekan untuk Inconel 718/WC-Co

μ_0	$T_{0,r}$	mr
0.46	200	2.4

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

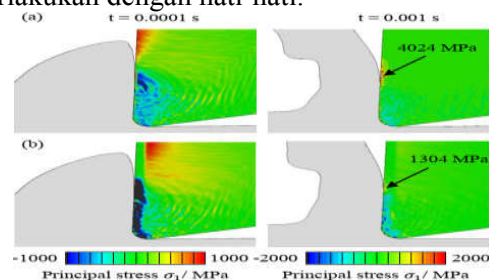
Evaluasi keseluruhan dari keadaan tegangan di dalam irisan pemotongan selama pemotongan memerlukan pemeriksaan tegangan ekuivalen utama dan von Mises. Menurut definisi, berikut ini berlaku untuk tegangan utama: $T_1 > T_2 > T_3$. Fraktur atau chipping dapat terjadi jika tegangan utama T_1 melebihi kekuatan tarik semen carbide [5, 7]. Gambar 3 menunjukkan tegangan utama yang disimulasikan σ_1 untuk pahat potong yang tidak dipakai (pahat referensi) tanpa tegangan sisa awal setelah waktu pemotongan 0,1 ms (yaitu fase masuk) dan setelah 1 ms secara berturut-turut. Setelah 1 ms, ketebalan chip adalah $h_{cu} \approx 14 \mu\text{m}$. Pada titik masuk ujung potong ($t = 0,1 \text{ ms}$), dua zona tegangan berbeda terbentuk pada irisan potong. Di area kontak toolchip, ada tekanan tekan yang nyata. Tegangan-tegangan ini merupakan reaksi terhadap tegangan normal tinggi yang bekerja pada permukaan penggaruk pada zona geser sekunder. Zona tegangan tarik yang diperpanjang terbentuk di bawah rake face dan di atas area kontak antara pahat dan chip. Karena gaya pemotongan F_c melebihi gaya normal pemotongan F_{cn} pada kasus perkakas yang tidak aus, beban tekuk yang dihasilkan menghasilkan tegangan tarik ini. Di dekat permukaan, tekanan mencapai 1000 MPa. Secara kualitatif, distribusi tegangan sesuai dengan hasil Agmell et al. [7].

Selama proses pembentukan chip, distribusi tegangan berubah. Karena pengurangan keseluruhan gaya pemotongan dengan penurunan ketebalan chip, maksimum di zona yang dijelaskan sebelumnya berkurang. Zona tegangan tarik lainnya terbentuk pada titik detasemen chip. Tegangan ini melebihi 500 MPa. Salah satu alasan yang mungkin untuk terjadinya tegangan tarik di area ini adalah pegas elastis dari lapisan permukaan alat dengan ukuran zona kontak yang terus berkurang antara chip dan alat. Pada saat yang sama, gaya potong spesifik dan lengan pengungkit antara gaya potong dan zona tegangan tarik meningkat



Gambar 3 Gambaran Umum Distribusi Tegangan Utama σ_1 untuk alat dengan $r\beta = 10 \mu\text{m}$ setelah $t_c = 0.1 \text{ ms}$ (masuknya alat pemotong) dan kemudian $t_c = 1 \text{ ms}$.

Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi untuk alat referensi secara rinci (a) serta tegangan utama dengan pertimbangan tegangan sisa (b). Maksimum lokal tegangan utama pada rake face di area terbatas (Gbr. 4a) juga diamati oleh Ulutan et al. [10] dan Tlustý dan Masood [11], mis. untuk memotong Ti-6Al-4V. Dengan nilai tegangan utama primer $\sigma_1 > 4000 \text{ MPa}$, kekuatan semen karbida akan terlampaui (kekuatan pecah transversal TRS: 3900 MPa) dan akibatnya mengakibatkan patah tulang. Hasil menunjukkan bahwa fase masuk dengan $h_{cu,max}$ belum tentu merupakan fase yang paling kritis. Agaknya, nilai-nilai spesifik tidak sesuai persis dengan realitas dalam besarnya. Satu penjelasan yang mungkin untuk perbedaan terletak pada diskontinuitas dalam kondisi kontak antara chip dan rake face. Oleh karena itu, nilai absolut di area kecil harus diperlakukan dengan hati-hati.

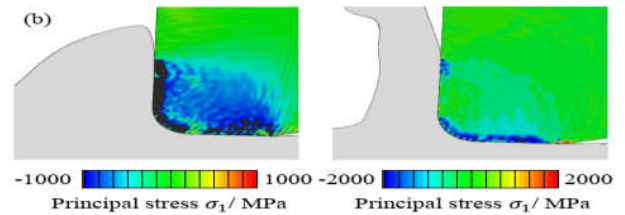
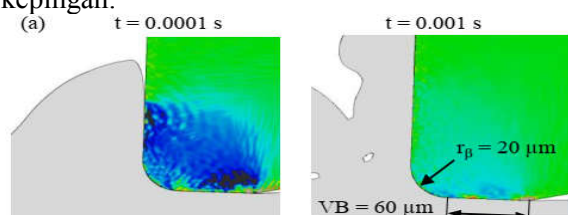


Gambar 4. Analisis rinci tegangan utama σ_1 untuk alat referensi tanpa (a) dan dengan (b) tegangan sisa.

Orang dapat melihat bahwa tekanan yang disimulasikan tidak homogen. Singularitas ini dapat dijelaskan dengan ketidakstabilan numerik. Namun, simulasi memungkinkan perbandingan antara tegangan sisa yang berbeda dan identifikasi situasi keterlibatan kritis. Pengaruh tegangan sisa pada σ_1 (Gambar 4 b) jelas terlihat untuk kedua kali pemotongan. Untuk $t = 0,1$ ms, tegangan sisa muncul sebagai zona tegangan tekan yang jelas di area kontak muka chip-rake dan sebagai area bebas tegangan di atas titik detasemen. Tegangan tekan di area di atas titik detasemen menjadi terlihat saat mengevaluasi tegangan utama sekunder σ_2 dan tekanan von Mises σ_v , Gambar 6. Patut dicatat bahwa tegangan tarik bekerja lebih dalam ke baji pemotongan jika tegangan sisa diperhitungkan. Tidak ada penjelasan yang jelas dapat diberikan untuk ini.

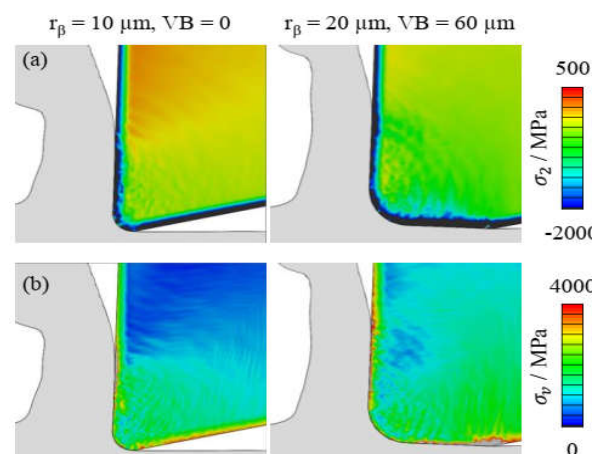
Untuk $t = 1$ ms, tegangan utama maksimal berkurang hampir 70%. Tegangan sisa melapiskan tegangan normal dan menghasilkan tegangan utama tekan antara jari-jari ujung potong dan ujung zona geser sekunder. Pengaruh positif tegangan sisa, dengan demikian, dapat diukur. Karena tegangan utama kritis terjadi secara langsung ($<3 \mu\text{m}$) di bawah permukaan, kemungkinan penyimpangan karena asumsi gradien tegangan sisa linier adalah kecil.

Gambar 5 menampilkan hasil pahat potong yang mengalami keausan flank dan radius ujung potong, yang meningkat dari awal $r_{\beta}, t_0 = 10 \mu\text{m}$ ke $r_{\beta}, t_1 = 20 \mu\text{m}$. Perubahan ini disebabkan oleh keausan abrasif dan perekat. Pada fase masuk, keadaan tegangan tekan yang jelas muncul di permukaan rake dan flank. Secara bersamaan, tidak ada tegangan tarik yang diamati di dekat permukaan penggaruk. Alasan untuk ini adalah peningkatan yang signifikan dalam pemotongan gaya normal dari $F_{cn, sim} \approx 180 \text{ N}$ ke $F_{cn, sim} \approx 500 \text{ N}$. F_{cn} hampir sama $F_c \approx 480 \text{ N}$. Tegangan prinsipal maksimal terjadi pada permukaan sayap terutama pada ujung tanah keausan sayap. Tegangan geser diharapkan menyebabkan fenomena ini. Nilai-nilai dari σ_1 berubah sedikit saja selama proses pemotongan, karena tegangan geser juga berkurang hanya sedikit di atas ketebalan kepingan.



Gambar 5. Distribusi tegangan utama σ_1 untuk alat dengan $r_{\beta} = 20 \mu\text{m}$ dan $VB = 60 \mu\text{m}$ tanpa (a) dan dengan (b) tegangan sisa

Pengaruh tegangan sisa (Gbr. 5b) untuk fase masuk sebanding dengan alat referensi. Namun, untuk $t = 1$ ms, medan tegangan tekan hanya muncul di ujung zona geser sekunder. Hal ini dapat dijelaskan dengan variasi tekanan kontak antara chip dan rake face. Pada dasarnya, perbandingan pahat dengan dan tanpa keausan flank menekankan bahwa area kritis dari tegangan tarik di dekat rake face cenderung terjadi untuk pahat baru ($VB = 0$) pada ketebalan chip yang lebih kecil. Peningkatan gaya normal pemotongan yang disebabkan oleh keausan flank dapat menstabilkan cutting edge. Dengan demikian, analisis ini mengkonfirmasi hasil Agmell et al. [7].



Gambar 6. Distribusi (a) tegangan utama σ_2 dan dari (b) tegangan setara von Mises σ_v untuk $t = 0.001$ s.

Gambar 6 membandingkan tegangan utama sekunder σ_2 dan tegangan von Mises σ_v untuk perkakas baru dan yang sudah aus. Profil kedalaman tegangan sisa menjadi jelas pada dua gambar teratas. Karena tegangan utama sekunder lebih kecil dibandingkan dengan nilai σ_1 , tegangan tersebut kurang penting untuk penentuan keadaan tegangan terkait kerusakan. Dua gambar terbawah dari Gambar 6 memvisualisasikan tekanan yang setara (von Mises). Nilai maksimal masing-masing mencapai sekitar $\sigma_v \approx 5000 \text{ MPa}$ di ujung sisi sayap dan sisi rake. Dalam kedua kasus, tegangan sisa melapiskan tegangan normal dan tegangan geser.

4 KESIMPULAN

Dalam makalah ini, dikembangkan metode baru untuk menghitung distribusi tegangan pada irisan pemotongan, yang mempertimbangkan tegangan sisa dan keausan pahat. Kondisi lapisan permukaan alat pemotong diperhitungkan dengan menerapkan tegangan sisa yang diukur dalam model. Geometri pahat ditentukan dengan mempertimbangkan keausan sisi. Simulasi FEM memungkinkan analisis kualitatif dan sebagian kuantitatif yang baik dari pengaruh tegangan sisa dan keausan pahat pada lapisan permukaan pahat potong. Untuk tingkat tegangan sisa yang diukur, simulasi menghitung pengurangan tegangan utama tegangan sekitar. 70% dan Keausan sayap harus diperhitungkan untuk simulasi yang lebih akurat. Meningkatkan gaya normal pemotongan F_{cn} mengurangi (dan akhirnya menghilangkan) tekukan baji pahat dan, akibatnya, tegangan tarik yang bekerja di dekat permukaan rake face.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penelitian ini.

REFERENCES

- [1] Klocke F. *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. edisi ke-9 Berlin,: Peloncat; 2018.
- [2] Heisel U. *Handbuch Spanen*. München: Hanser; 2014. (Ed. *Handbuch der Fertigungstechnik*).
- [3] Barthelmä F, Frank H, Schiffler M, Bartsch A. Lapisan Keras untuk Meningkatkan Pemesinan Bahan Berbasis Nikel. *Procedia CIRP* 2016;46:294–8.
- [4] Klocke F, Seimann M, Binder M, Doebbeler B. Penggilingan Slot Pohon Cemara di Allvac 718 plus. *Procedia CIRP* 2018; 77:409–12.
- [5] Bergmann B. *Grundlagen zur Auslegung von Schneidkantenverrundungen*. Garbsen: PZH Verlag; 2017. (Berichte aus dem IFW 2017, 9).
- [6] Bouzakis KD, Bouzakis E, Kombogiannis S, Makrimalakis S, Skordaris G, Michailidis N et al. Pengaruh penyiapan ujung tombak dari perkakas berlapis pada kinerjanya dalam menggiling berbagai bahan. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2014; 7(3):264–73.
- [7] Agmell M, Ahadi A, Gutnichenko O, Ståhl J-E. Pengaruh mikrogeometri pahat terhadap distribusi tegangan pada operasi pembubutan AISI 4140 dengan analisis FE. Dalam: *Int J Adv Manuf Technol* 89. 2017. hal. 3109–3122
- [8] Özel T. Pemodelan komputasi putaran 3D: Pengaruh mikro-geometri tepi pada gaya, tekanan, gesekan, dan keausan pahat dalam perkakas PcBN. *Jurnal Teknologi Pengolahan Bahan* 2009; 209(11):5167–77.
- [9] Arrazola PJ, Özel T, Payung D, Davies M, Jawahir IS. Kemajuan terbaru dalam pemodelan proses pemesinan logam. *Sejarah CIRP* 2013; 62(2):695–718.
- [10] Ulutan D, Özel T. Penentuan gesekan pahat dengan adanya flank wear dan distribusi tegangan berdasarkan validasi menggunakan simulasi elemen hingga dalam pemesinan paduan berbasis titanium dan nikel. *Jurnal Teknologi Pengolahan Bahan* 2013; 213(12):2217–37.
- [11] Tlustý J, Masood Z. Chipping dan Kerusakan Alat Karbida. *Jurnal Teknik Industri* 1978; 100(4):403–12.
- [12] Jawahir IS, Brinksmeier E, M'Saoubi R, Aspinwall DK, Outeiro JC, Meyer D et al. Integritas permukaan dalam proses pemindahan material: Kemajuan terbaru. *Sejarah CIRP* 2011; 60(2):603–26.
- [13] Bouzakis KD, Charalampous P, Kotsanis T, Skordaris G, Bouzakis E, Denkena B et al. Pengaruh kebulatan tajam substrat HM yang diproduksi oleh pemesinan laser dan peledakan mikro pada kinerja pemotongan alat yang dilapisi. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2017; 18:188–97.
- [14] Breidenstein B, Gey C, Denkena B. Integritas permukaan alat pemotong karbida mesin laser dalam rantai proses pelapisan PVD. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 2013; 44(8):704–9.
- [15] Yang J, Odén M, Johansson-Jöesaar MP, Llanes L. Efek Gerinda pada Integritas Permukaan dan Kekuatan Mekanik Karbida Semen WC-Co. *Procedia CIRP* 2014; 13:257–63.

- [16] B, Bergs T, Schraknepper D, Klocke F, Döbbeler B. Pendekatan hibrid menggunakan pembelajaran mesin untuk memprediksi gaya potong berdasarkan pertimbangan keausan pahat. *Procedia CIRP* 2019; 82:302–7.
- [17] Johnson, G.R.; Cook, W. H. (1983): Sebuah model dan data konstitutif untuk logam yang mengalami regangan besar, laju regangan tinggi, dan suhu tinggi. Dalam: *Prosiding Int ke-7. Simposium Balistik*, Den Haag, Belanda, 541-547
- [18] Johnson, G.R.; Cook, W. H. (1985): Karakteristik fraktur dari tiga logam yang mengalami berbagai regangan, laju regangan, suhu dan tekanan. Dalam: *Rekayasa Mekanika Fraktur*. Vol. 21, No. 1, hlm.31–48
- [19] Erice B, Gálvez F. Model konstitutif kerusakan elastoplastik yang digabungkan dengan kriteria kegagalan bergantung sudut Lode. *Jurnal Internasional Padatan dan Struktur* 2014; 51(1):93–110.
- [20] Seimann M, Peng B, Fischersworing-Bunk A, Rauch S, Klocke F, Döbbeler B. Model-based analysis in finish broaching of inconel 718. *Int J Adv Manuf Technol* 2018; 97(9-12):3751–60.
- [21] Puls H, Klocke F, Lung D. Investigasi eksperimental pada gesekan dalam kondisi pemotongan logam. *Pakai* 2014; 310(1-2):63–71.
- [22] Bergs T, Gierlings S, Auerbach T, Klink A, Schraknepper D dkk. Konsep Digital Twin dan Digital Shadow di Manufaktur. *Procedia CIRP* 2021; dalam pers