



Optimasi Parameter Material untuk Simulasi Pemotongan Ortogonal AISI4140 pada Berbagai Kondisi Tempering

*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: Pemotongan, perawatan panas, pemodelan</p> <p>Keywords: Cutting, heat treatment, modeling</p>	<p>Abstract — <i>The mechanical parameters of quenched and tempered AISI4140 and the machining process characteristics are depending on the material's tempering state. The process characteristics of practical relevance are not only the cutting forces and the tool wear, but also the surface layer states of the machined part. In order to predict and to improve these characteristics efficiently, chip forming simulation via finite element method (FEM) is commonly applied. However, an issue in machining simulation which is often addressed is choosing appropriate material parameters for the flow stress model. This especially accounts for AISI4140 with various tempering conditions, as in many cases the precise heat treatment is not supplied in detail, even in scientific literature. In this work, orthogonal cutting of AISI4140 with tempering temperatures of 300°C, 450°C and 600°C is investigated by experiments and FE simulations. The Johnson-Cook flow stress model is used in the FE simulation. The referring material parameters for the tempering conditions are iteratively adapted via numerical optimization to fit experimental cutting forces. The obtained parameters are compared to literature values in order to prepare a common ground for the cutting simulation of AISI4140. This contributes to an enhanced process modelling when machining AISI4140 with use-case adapted heat treatments.</i></p> <p>Abstrak— Parameter mekanis AISI4140 yang dipadamkan dan ditempa serta karakteristik proses pemesinan bergantung pada kondisi tempering material. Karakteristik proses relevansi praktis tidak hanya gaya pemotongan dan keausan pahat, tetapi juga kondisi lapisan permukaan bagian mesin. Untuk memprediksi dan meningkatkan karakteristik ini secara efisien, simulasi pembentukan chip melalui metode elemen hingga (FEM) biasanya diterapkan. Namun, masalah dalam simulasi pemesinan yang sering dibahas adalah memilih parameter material yang sesuai untuk model tegangan aliran. Ini terutama menjelaskan AISI4140 dengan berbagai kondisi temper, karena dalam banyak kasus perlakuan panas yang tepat tidak diberikan secara rinci, bahkan dalam literatur ilmiah. Dalam karya ini, pemotongan ortogonal AISI4140 dengan temperatur tempering 300°C, 450°C dan 600°C diselidiki melalui eksperimen dan simulasi FE. Model tegangan aliran Johnson-Cook digunakan dalam simulasi FE. Parameter material rujukan untuk kondisi temper diadaptasi secara iteratif melalui optimasi numerik agar sesuai dengan gaya pemotongan eksperimental. Parameter yang diperoleh dibandingkan dengan nilai literatur untuk menyiapkan landasan bersama untuk simulasi pemotongan AISI4140. Ini berkontribusi pada pemodelan proses yang ditingkatkan saat pemesinan AISI4140 dengan perlakuan panas yang disesuaikan dengan kasus penggunaan.</p>
--	--

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



I. PENDAHULUAN

Pemodelan numerik pemesinan diinginkan karena berbagai alasan. Salah satunya adalah

teknik permukaan, yang membutuhkan analisis eksperimental dan metalografi yang mendalam. Simulasi Elemen Hingga (FE) dapat mengurangi upaya yang terlibat, tetapi ini antara lain

membutuhkan pengetahuan tentang kurva tegangan aliran dari material yang dikerjakan.

Titik awal dari pekerjaan ini adalah perlunya metode identifikasi yang kuat untuk parameter tegangan aliran material terkait beberapa tingkat percobaan pemesinan, beberapa nilai target, dan beberapa kondisi tempering[1]. Perlakuan panas lainnya diterapkan saat diperlukan kekerasan yang lebih tinggi atau kekuatan yang lebih tinggi[2]. Kalibrasi parameter tegangan aliran adalah tugas yang sulit karena regangan pemesinan, laju regangan, dan suhu tidak tercapai dalam uji karakterisasi material konvensional. Özel dan Zeren [3] mengatasi masalah ini dengan menggabungkan data uji material dan pemesinan, serta model zona geser analitik Oxley untuk mengoptimalkan tegangan aliran dan parameter gesekan dalam pemesinan logam secara numerik. Storchak et al. menggunakan pendekatan gabungan ini dan membandingkannya dengan pengoptimalan hanya berdasarkan pengujian material[4].

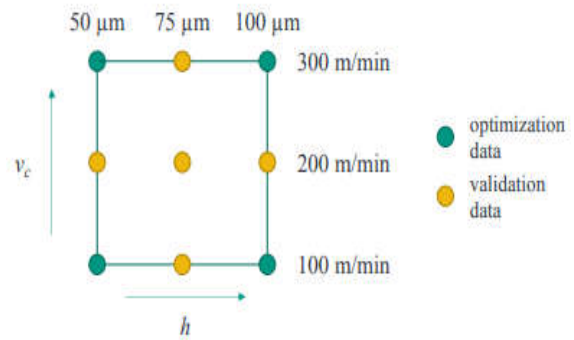
Stampfer menyelidiki pemotongan ortogonal AISI4140 QT dengan suhu tempering 400°C, menggunakan model tegangan aliran Johnson-Cook. Parameter A , B dan n diidentifikasi dengan uji tarik, sedangkan C dan m dikalibrasi agar sesuai dengan daya potong, rasio gaya dan ketebalan chip dari empat level uji potong. Tren eksperimental dari target tersebut dipenuhi oleh simulasi. Dengan demikian parameter tegangan aliran dipilih sebagai nilai awal alternatif untuk algoritma optimasi[3].

Berfokus pada rekayasa permukaan dan beban benda kerja, geometri chip tidak dianalisis di sini, tetapi gaya pasif akan diperhitungkan, karena bekerja normal pada permukaan mesin. Masalah identifikasi parameter Johnson Cook untuk simulasi pemesinan adalah ambiguitas yang tampak dari solusi turunan. Hal ini diatasi dengan pertimbangan beberapa tingkat eksperimen selama prosedur pengoptimalan.

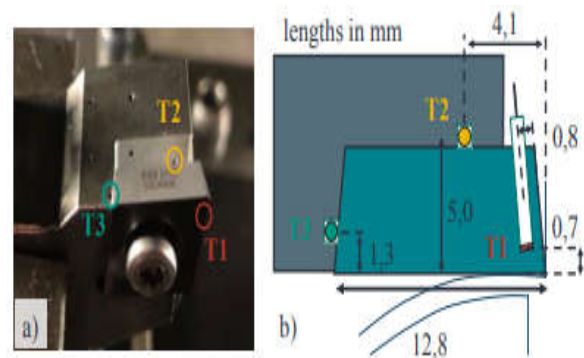
II. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 FE model

Uji bubut kering ortogonal dilakukan pada mesin bubut CNC vertikal tipe Index V100 dengan pahat karbida berlapis TiCN tipe Walter CCMW120404 - RK6 WKK10S. Nilai-nilai parameter proses bervariasi sepenuhnya faktorial ditentukan dalam Gambar 2.



Gambar 1. Parameter proses uji bubut ortogonal yang dilakukan dengan AISI4140 QT 300, QT 450 dan QT 600.



Gambar 2. Posisi pahat potong dan termokopel: (a) Gambar, (b) sketsa tampak atas, penampang di tengah bidang potong.

Simulasi FE dilakukan dengan perangkat lunak Simufact Forming 16.0 berbasis MSC Marc 2018. Untuk pemodelan material benda kerja digunakan plastisitas von Mises dan persamaan tegangan aliran Johnson-Cook. Putaran ortogonal disimulasikan sebagai proses dua dimensi dengan asumsi regangan biasa dan integrasi waktu yang eksplisit[5]. Selanjutnya formulasi Arbitrary Lagrange Eulerian dengan remeshing benda kerja yang sering digunakan, yang menghasilkan panjang tepi elemen minimum 8 μm . Parameter konstanta model FE dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameters of the FEM Simulation

inc	l_c μm	α_{air} $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	θ_0 K	θ_m K	$\bar{\epsilon}$
200	500	50	293	1820	1

Kontak benda kerja pahat dimodelkan oleh Persamaan. (2). Di sini τ_f menunjukkan tegangan geser kontak, σ_n tegangan normal kontak, μ koefisien gesekan coulomb dan τ koefisien gesekan geser.

$$\Delta F_n = \Delta F_n / F_{sum,exp}$$

$$\tau_f = \begin{cases} \mu * \sigma_n \rightarrow \text{when } \mu * \sigma_n < \sigma_f \\ \tau * \sigma_f \rightarrow \text{when } \mu * \sigma_n > \sigma_f \end{cases} \quad (2)$$

2.2 Prosedur optimasi

Pengoptimalan dijalankan secara independen untuk AISI4140 QT 300, QT 450 dan QT 600. Pada Gambar 2, set parameter pemotongan yang dipilih untuk pengoptimalan digambarkan. Pada langkah pertama, file input dari simulasi dibuat dengan Simufact Forming. Setelah itu file input .dat dari setiap simulasi dimodifikasi, sehingga dapat membaca parameter tegangan aliran dari file eksternal. Prosedur pengoptimalan dimulai dengan skrip utama yang diimplementasikan di Matlab R2020a. Di dalamnya, fungsi fminsearch dipanggil, yang pada dasarnya mengambil parameter Jonson-Cook awal dan memanggil skrip fungsi target yang ditulis pengguna. Skrip menyalin parameter Johnson-Cook yang diterima ke dalam file teks, yang berfungsi sebagai input tambahan untuk model FE dan memulai simulasi yang telah disiapkan dalam for-loop paralel. Setelah menyelesaikan simulasi, gaya proses dibandingkan dengan nilai eksperimen dengan fungsi target aktual, yang diberikan oleh:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(F_{c,exp,i} - F_{c,sim,i})^2 + (F_{c,exp,i} - F_{c,sim,i})^2} \quad (3)$$

Sebagai kuantitas tambahan untuk evaluasi deviasi gaya, akumulasi gaya eksperimental didefinisikan sebagai:

$$F_{sum,exp} = \sum_{i=1}^4 \sqrt{F_{c,exp,i}^2 + F_{c,exp,i}^2} \quad (4)$$

Untuk keadaan material AISI4140 QT 600, QT 450 dan QT 300 menghasilkan nilai 4301 N, 4786 N dan 5821 N. Dengan demikian simpangan gaya dapat dinormalkan menurut:

$$\Delta F_n = \Delta F_n / F_{sum,exp} \quad (5)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Operasi optimasi pertama dilakukan dengan parameter awal yang diidentifikasi dalam [6]. Parameter tegangan aliran yang dihasilkan dan deviasi gaya ternormalisasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter tegangan aliran dan akumulasi deviasi gaya yang dihasilkan dari DSA dengan nilai awal.

Parameter	A MPa	B MPa	C -	m -	n -	ΔF_n %
Start	595.0	580.0	0.023	1.03	0.133	-
QT 600	637.75	608.14	0.0241	0.9193	0.1352	4.3
QT 450	722.23	659.30	0.0255	0.9499	0.0912	3.4
QT 300	1312.0	1091.6	0.0231	0.4105	0.0776	5.4

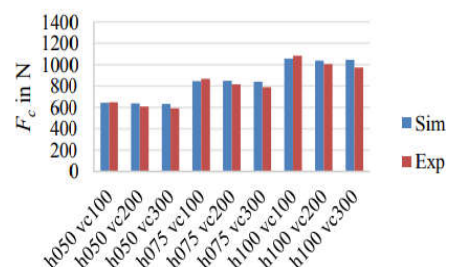
Penyimpangan gaya dapat dianggap sangat rendah. Parameter tegangan aliran AISI4140 QT

600 mendekati nilai awal. Kekuatan luluh yang teridentifikasi dari AISI4140 QT 450 lebih tinggi daripada QT 600, yang masuk akal juga. Masih ada yang mengharapkan nilai yang lebih tinggi, mengingat bahwa pada kekuatan luluh 1450 MPa diidentifikasi untuk tempering dengan 400 °C[7]. Parameter material yang dioptimalkan dari Tabel 2 digunakan untuk simulasi bidang parameter proses lengkap.

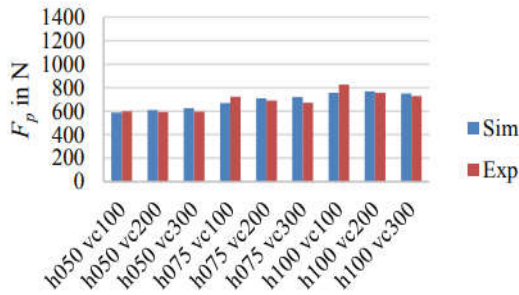
Pada Gambar 4 dan Gambar 5, gaya pemesinan yang disimulasikan dan eksperimental dari AISI4140 QT 600 digambarkan. Optimalisasi eksperimental dan data validasi diprediksi sama baiknya. Selain itu, evolusi gaya eksperimental dengan ketebalan pemotongan diperkirakan sepenuhnya memuaskan. Sementara gaya potong eksperimental menurun secara signifikan dengan kecepatan potong, trennya kurang terlihat dalam simulasi. Selain itu, tren penurunan gaya pasif eksperimental tidak ada dalam simulasi. Penjelasan yang mungkin adalah, bahwa koefisien gesekan berkurang dengan kecepatan geser [8], sementara itu tetap konstan dalam simulasi ini.

IV. KESIMPULAN

Hasil yang disajikan membuktikan penerapan DSA untuk identifikasi tingkat multi-parameter dari parameter tegangan aliran Johnson-Cook. Kesepakatan absolut dan relatif dari kekuatan proses sangat baik. Namun, beberapa tren kecil sulit diprediksi, mis. ketika gaya pasif meningkat dengan kecepatan potong, sementara gaya potong berkurang. Pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan hal ini dapat dilakukan dengan memodelkan efek termal dan gesekan sensitif kecepatan pemotongan dengan lebih tepat. Secara umum, kesepakatan yang baik dari kekuatan proses yang diukur dan disimulasikan adalah dasar yang kuat untuk pemodelan integritas permukaan, seperti tegangan sisa, penyempurnaan butiran atau transformasi fasa. Simulasi pemanasan pahat transien dan penerapan metode optimisasi pada model integritas permukaan akan dipelajari pada pekerjaan selanjutnya.

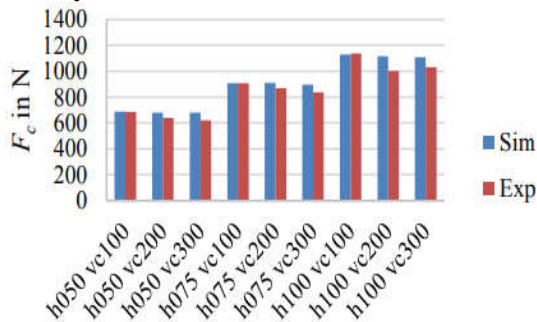


Gambar 3. Perbandingan gaya potong AISI4140 QT 600 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2.

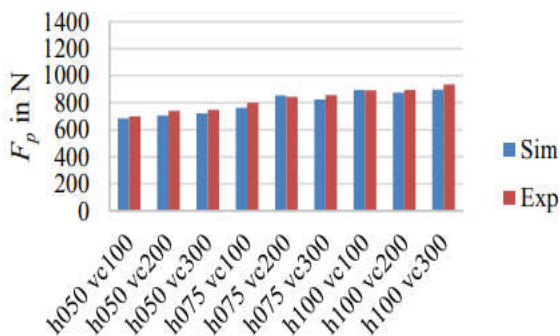


Gambar 4. Perbandingan gaya pasif AISI4140 QT 600 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2.

Perbandingan kekuatan proses simulasi dan eksperimental AISI4140 QT 450 diberikan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Data optimasi dan validasi eksperimental diprediksi sama baiknya. Selain itu, evolusi gaya eksperimental dengan ketebalan pemotongan diperkirakan sepenuhnya memuaskan. Sementara tren penurunan gaya potong dengan kecepatan potong hampir tidak terpenuhi dalam simulasi, tren peningkatan gaya pasif eksperimental dengan kecepatan potong umumnya ada.



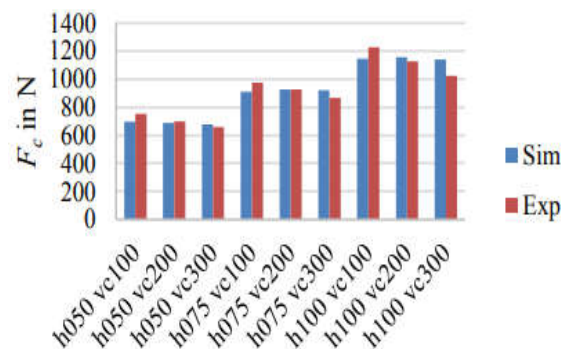
Gambar 5. Perbandingan gaya potong AISI4140 QT 450 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2



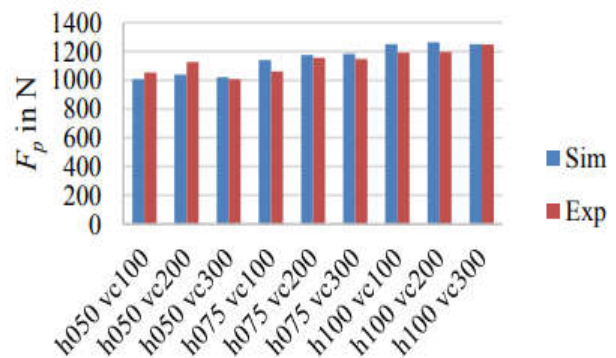
Gambar 6. Perbandingan gaya pasif AISI4140 QT 450 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2.

Gaya pemesinan AISI4140 QT 300 digambarkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Dibandingkan dengan keadaan material yang dianggap sebelumnya, tren penurunan gaya potong eksperimental dengan kecepatan potong

dikembangkan lebih kuat. Selain itu, tingkat umum gaya potong hampir tidak meningkat, dibandingkan dengan keadaan material lainnya. Namun gaya pasif eksperimental hampir dua kali lipat, ketika membandingkan AISI4140 QT 600 dengan QT 300. Dapat disimpulkan bahwa kekerasan material utama mempengaruhi gaya normal pada sisi pahat. Ini lebih lanjut menunjukkan bahwa panjang kontak sayap benda kerja sangat penting untuk prediksi gaya pasif yang baik, terutama untuk bahan benda kerja keras. Mengenai set parameter proses untuk pengoptimalan dan validasi, gaya disimulasikan dengan sama baiknya. Selanjutnya evolusi kekuatan dengan ketebalan pemotongan diperkirakan memuaskan. Mengenai evolusi gaya eksperimental dengan kecepatan potong, gaya potong berkurang dan gaya pasif meningkat. Tren tersebut tidak dipenuhi oleh simulasi. Secara umum, sulit untuk membayangkan bahwa perubahan kurva tegangan aliran dapat menyebabkan peningkatan satu komponen gaya dan penurunan komponen lainnya. Simulasi tambahan menunjukkan bahwa rasio pemotongan dan gaya pasif dapat diubah oleh koefisien gesekan coulomb. Mengingat bahwa gesekan berubah dengan kecepatan potong, arah yang berlawanan dari komponen gaya dapat dibayangkan.



Gambar 7. Perbandingan gaya potong AISI4140 QT 300 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2



Gambar 8. Perbandingan gaya pasif AISI4140 QT 300 dengan parameter tegangan aliran optimal sesuai Tabel 2.

Optimalisasi juga dilakukan dengan parameter material awal yang diidentifikasi pada [7]. Pada Tabel 3 ditampilkan parameter tegangan aliran dan deviasi gaya normalisasi. Penyimpangan gaya rendah dan serupa dengan Tabel 2. Ini menunjukkan bahwa perbedaan antara gaya yang disimulasikan dengan set parameter alternatif yang dioptimalkan juga harus rendah. Oleh karena itu perbandingan kekuatan proses individu tidak diulangi pada saat ini. Penyimpangan gaya yang rendah pada Tabel 2 dan Tabel 3 mencerminkan kemampuan DSA untuk menemukan minima yang setara dalam fungsi target, saat memulai dari nilai awal yang berbeda. Namun parameter tegangan aliran yang teridentifikasi dapat berbeda secara mendasar. Hal ini menunjukkan bahwa masalah ambiguitas parameter tegangan aliran Johnson-Cook tidak dapat diselesaikan secara andal dengan memperhatikan beberapa tingkat pemesinan.

Kekuatan luluh yang ditentukan pada Tabel 3 lebih tinggi daripada Tabel 2. Ini membuat parameter yang ditetapkan pada Tabel 3 untuk AISI4140 QT 450 dan QT 300 lebih meyakinkan dari sudut pandang fisik dan menunjukkan bahwa metode pengoptimalan yang disajikan mengarah pada hasil yang baik, mengingat parameter awal yang sesuai. Sebagai alternatif, kekuatan luluh yang mudah diakses dapat diambil sebagai nilai tetap.

Tabel 3. Parameter tegangan aliran dan akumulasi deviasi gaya yang dihasilkan dari DSA dengan nilai awal [7].

Parameter	A	B	C	m	n	ΔF_n
Unit	MPa	MPa	-	-	-	%
Start	1450.0	910.0	0.034	0.328	0.450	-
QT 600	1232.5	988.66	0.0362	0.2913	0.4896	4.0
QT 450	1485.1	939.54	0.0352	0.3210	0.4404	3.4
QT 300	1743.4	852.15	0.0392	0.3605	0.3097	6.8

Dalam pekerjaan selanjutnya simulasi pemesinan harus digunakan untuk prediksi keadaan permukaan. Mempertimbangkan bahwa transformasi fasa dan proses rekristalisasi sebagian besar didorong oleh suhu, pemodelan proses termal akan menjadi relevan. Jadi asumsi masing-masing dianalisis, berdasarkan suhu alat yang diukur. Mengenai termokopel T1, suhu yang diprediksi berada di kisaran 390 °C hingga 570 °C dan meningkat dengan kecepatan pemotongan dan ketebalan pemotongan. Temperatur tersebut tidak berkorelasi dengan keadaan material, yang menunjukkan bahwa pengoptimalan tidak bergantung pada temperatur pahat. Suhu yang diukur secara eksperimental berkisar antara 270 °C hingga

365 °C. Estimasi suhu pahat yang terlalu tinggi dalam simulasi dapat memiliki banyak alasan, mis. pengabaian aliran panas yang normal ke bidang pemotongan atau koefisien gesekan yang terlalu tinggi antara pahat dan benda kerja. Namun poin utamanya adalah, berbeda dengan simulasi, alat tersebut tidak mencapai kondisi stabil termal dalam percobaan, meskipun volume pemotongan 5419 mm³. Ini dikonfirmasi oleh kemiringan termokopel yang berjalan pada akhir proses. Konsekuensinya, kapasitas panas alat tidak boleh dikurangi hingga hampir nol, seperti yang dilakukan dalam model yang disajikan, tetapi harus dikurangi sedemikian rupa sehingga alat cukup panas selama simulasi, sehubungan dengan panjang pemotongan eksperimental.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penelitian ini.

REFERENCES

- [1] A. Stoll and P. Benner, "Machine learning for material characterization with an application for predicting mechanical properties," *GAMM-Mitteilungen*, vol. 44, no. 1, p. e202100003, 2021.
- [2] A. Caballero, J. Ding, S. Ganguly, and S. Williams, "Wire+ Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 268, pp. 54–62, 2019.
- [3] B. Stampfer, G. González, E. Segebade, M. Gerstenmeyer, and V. Schulze, "Material parameter optimization for orthogonal cutting simulations of AISI4140 at various tempering conditions," *Procedia CIRP*, vol. 102, pp. 198–203, 2021.
- [4] D. Zhang, X.-M. Zhang, G.-C. Nie, Z.-Y. Yang, and H. Ding, "Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 160, p. 103672, 2021.
- [5] P. N. Thekdi, "Finite Element Studies of Orthogonal Machining of Aisi 1045 Steel," 2019.
- [6] A. Komuro *et al.*, "Influence of discharge energy on the lift and drag forces induced by a nanosecond-pulse-driven plasma actuator," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 28, no. 6, p. 065006, 2019.
- [7] D. C. G. Coy, P. A. E. Muñoz, F. L. Zapata, J. A. O. Torres, and C. A. Zuluaga, "Machining

by Chip Removal: Bibliometric Analysis, Evolution, and Research Trends,” *J. Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 57, no. 3, 2022.

- [8] G. Ranjith Kumar, G. Rajyalakshmi, and S. Swaroop, “A critical appraisal of laser peening and its impact on hydrogen embrittlement of titanium alloys,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 233, no. 13, pp. 2371–2398, 2019.