

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**A R M A T U R**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Studi Eksperimental Pengaruh Parameter Pengeboran terhadap Karakteristik Burr pada Pengeboran Tulang Kortikal**Arzaq Guruh Dityamri^{1*}, Gusri Akhyar Ibrahim², Muh Thohirin³, Wisnaningsih³
Syaipudin Anwar², An-Nisa Magnolia²^{1,3}Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Jl. Imam Bonjol No. 468 Langkapura, Bandar Lampung, 35154.²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145.**A R T I C L E
I N F O****Keywords:***Drilling of bone, burr formation, Response Surface Methodology, Box–Behnken design, drilling parameters***A B S T R A C T**

Cortical boe drilling is a critical step in orthopedic procedures because the quality of the drilled hole directly affects implant stability and the surrounding biological tissue. One phenomenon frequently observed during drilling is burr formation at the hole edge, which may interfere with screw insertation and increase the risk of tissue irritation. Despite its practical importance, studies focusing on burr morphology in bone drilling remain limited. This study investigates the morphological tendencies of burr formation under different drilling parameters. The experiments were designed using respon surface methodology (RSM) with a Box-Behnken design. Drilling tests were conducted on fresh bovine cortical bone using a three axis CNC machine with spindle speeds of 500, 1000, and 1500 rpm, feed rates of 35, 60 and 85 mm/min, and three cooling condition, NaCl solution, OpSite Spray and dry drilling. Burr morphology was evaluated through visual observation using a USB microscope. The results indicate that feed rate has the most significant influence on burr formation, followed by spindle speed and cooling condition. Lower feed rates combinded with higher spindle speeds tend to produce smother hole edges with smaller burr formtion, particularly under cooling conditions.

*Corresponding author: arzaqguruh14@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10934>

Received 4 January 2026; Received in revised form 5 March 2026; Accepted 9 March 2026

Available online March 2026

Pendahuluan

Pengeboran tulang kortikal merupakan salah satu tahapan penting dalam prosedur bedah ortopedi terkhusus pada pemasangan skrup dan juga fiksasi implant. Kualitas lubang yang dihasilkan berperan langsung dalam menentukan stabilitas awal implant serta respon jaringan di sekitar tulang. Lubang bor yang terbentuk dengan tidak baik dapat menyebabkan ketidakteatan pemasangan sekrup, serta berpotensi menimbulkan gangguan pada proses penyembuhan tulang [1],[2],[3].

Penelitian sebelumnya mengenai pengeboran tulang sebagian besar berfokus pada aspek kerusakan thermal dan peningkatan temperature selama proses pengeboran tulang, dimana temperature dalam pengeboran tulang tidak boleh lebih dari 47^o. Selain itu, sejumlah penelitian juga mengevaluasi kualitas pengeboran melalui parameter lain seperti kekasaran permukaan lubang bor, gaya potong, serta stabilitas proses pemesinan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter proses seperti kecepatan putar, laju pemakanan, serta kondisi pendinginan memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas hasil pengeboran [4],[5]. Laju pemakanan yang tinggi, misalnya, dapat meningkatkan gaya dorong dan ketebalan chip sehingga memperbesar deformasi material pada tepi lubang. Sementara itu, penggunaan cairan pendingin eksternal seperti larutan NaCl dilaporkan mampu mengurangi kenaikan temperatur dan memperbaiki integritas permukaan dibandingkan dengan kondisi pengeboran kering.

Meskipun berbagai penelitian meginformasikan mengenai aspek thermal dan kualitas permukaan pada pengeboran tulang, terdapat fenomena mekanis yang sering terjadi di tepi lubang bor yang jarang dikaji secara spesifik. Salah satu fenomena yang sering terjadi adalah terbentuknya burr pada bagian masuk maupun keluar pada lubang bor. Burr yang terbentuk secara berlebih dapat mengganggu kepresisian pemasangan sekrup serta berpotensi menimbulkan iritasi atau trauma pada

jaringan di sekitar area pengeboran [2],[6],[7]. Dalam proses pemesinan bor tulang, burr terbentuk akibat kombinasi deformasi plastis dan fraktur mikro pada tulang selama proses pemotongan berlangsung. Karakteristik burr tersebut dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, termasuk kecepatan putar, laju pemakanan, serta kondisi pendinginan yang digunakan selama pengeboran.

Namun demikian, sebagian besar besar sebelumnya cenderung menempatkan burr sebagai fenomena tambahan tanpa dikaji secara khusus. Fokus utama penelitian masih didominasi oleh analisa temperature atau kekasaran permukaan, sehingga hubungan parameter pengeboran dan pembentukan burr masih jarang dilaporkan. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kebutuhan untuk memahami lebih jauh bagaimana variasi parameter proses memengaruhi karakter pembentukan burr pada tepi lubang bor baik menggunakan cairan pendingin ataupun kering [8],[9],[10].

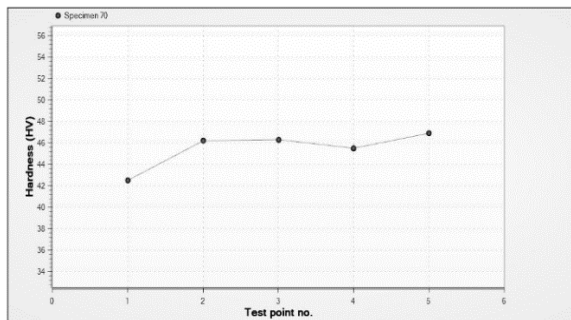
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik morfologi burr yang terbentuk selama proses pengeboran tulang kortikal dengan mempertimbangkan variasi kecepatan putar, laju pemakanan, dan kondisi pendinginan. Rancangan eksperimen disusun menggunakan pendekatan *Respon Surface Methodology* (RSM) dengan desain Box Behnken untuk mengatur kombinasi parameter secara sistematis.

Metode Penelitian

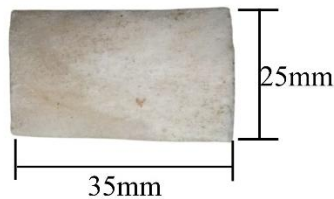
Pemilihan material pada penelitian ini adalah tulang kortikal sapi segar yang dipakai dikarekakan karakteristik mekanik dan struktur yang mendekati tulang kortikal manusia, sehingga banyak digunakan dalam studi biomekanik eksperimental, pemilihan material tulang kortikal sapi juga menerapkan prinsip refinement, replacement and responsibility [11], tulang kortikal yang sudah dibersihkan dari jaringan lunak agar terbebas dari sisa sisa

lemak yang menempel pada tulang [10],[11].

Untuk memastikan keseragaman material dilakukan uji kekerasan Vickers dan diperoleh nilai rata-rata sebesar 45,5 HV dengan variasi yang relative lebih kecil sehingga spesimen dianggap memiliki homogenitas yang cukup memadai untuk digunakan dalam pengujian, kemudian spesimen dibentuk seperti balok dengan dimensi rata-rata panjang 35 mm, lebar 25 mm dan dipilih dengan ketebalan 8 mm.



Gambar 1. Grafik uji kekerasan Vickers tulang

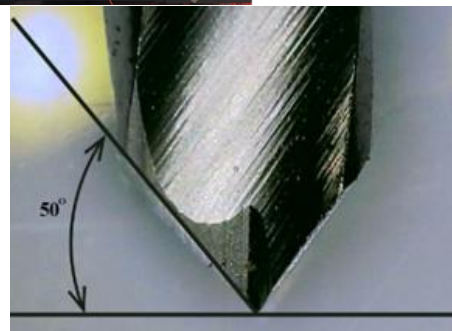
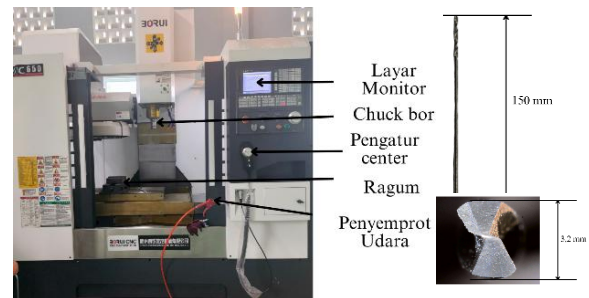


Gambar 2. Spesimen tulang kortkal yang sudah dipotong

Proses pengeboran dilakukan dengan mesin CNC 3 axis guna menjamin kestabilan parameter proses dan akurasi presisi pengeboran. Mata bor yang digunakan berbahan stainless steel 316L dengan diameter 3,2 mm dan panjang 150 mm serta sudut mata bor 50° yang umum digunakan pada bedah ortopedi. Untuk menghindari keausan pahat terhadap pembentukan burr, setiap percobaan dilakukan dengan mata bor baru. Proses pengeboran dilaksanakan dengan posisi tegal lurus dengan satu kali lintasan pengeboran [3],[12].

Parameter dan desai eksperimen ini melibatkan tiga parameter utama yaitu laju kecepatan putar, laju pemakanan dan penggunaan cairan pendingin. Kecepatan

putar divariasikan pada 500 rpm, 1000 rpm, dan 1500 rpm, sedangkan laju pemakanan divariasikan pada 35 mm/min, 65 mm/min, dan 85 mm/min.



Gambar 3. CNC milling dan mata bor SS316L

Jenis pendingin yang digunakan meliputi kondisi pengeboran kering, pendinginan menggunakan larutan NaCl, dan pendinginan menggunakan OpSite spray. Rentang parameter tersebut dipilih berdasarkan studi terkini yang melaporkan pengaruh signifikan parameter mekanis dan pendinginan terhadap kualitas lubang dan pembentukan burr pada pengeboran tulang kortkal [13],[3].

Tabel 1. Parameter penelitian

No	Parameter	-1	0	1
1	Kecepatan Putar (rpm)	500	1000	1500
	Laju Pemakanan (mm/min)	35	60	85
2	Cairan Pendingin (L)	NaCl	OpSite	Kering

Desain eksperimen disusun menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan rancangan *Box-Behnken* yang terdiri dari 15 kombinasi percobaan. Metode ini dipilih karena efektif

dalam mengevaluasi pengaruh parameter secara individual maupun interaksi antar parameter dengan jumlah percobaan yang relatif efisien, sebagaimana banyak digunakan pada penelitian manufaktur dan biomekanik dalam lima tahun terakhir [10],[14].

Evaluasi hasil atau respon difokuskan pada karakteristik burr yang terbentuk pada tepi masuk dan tepi keluar lubang bor. Pengamatan dilakukan dengan *microscop* USB untuk memperoleh visualisasi detail dari bentuk burr yang terbentuk pada setiap pengeboran. Analisa difokuskan pada identifikasi kecenderungan morfologi burr melalui perbandingan visual antar kondisi parameter pengeboran, seperti ukuran burr yang terbentuk, ketidakteraturan tepi lubang serta material yang terdeformasi di sekitar lubang bor. Hasil pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi kondisi parameter pengeboran yang membentuk burr relative lebih kecil dan tepi lubang yang halus [13],[15].

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan morfologi burr menunjukkan bahwa parameter pengeboran memberikan pengaruh yang berbeda terhadap mekanisme deformasi material di sekitar tepi lubang dapat dilihat pada Tabel 2. Pada kombinasi laju pemakanan rendah hingga menengah yakni 35mm/min – 60 mm/min dengan kecepatan putar menengah hingga tinggi, burr yang terbentuk cenderung lebih kecil dan relatif halus. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pemotongan berlangsung lebih stabil sehingga pemisahan material terjadi secara bertahap dengan deformasi plastis yang terbatas. Fenomena tersebut sejalan dengan konsep mekanika pemotongan yang menyatakan bahwa kestabilan proses pemotongan meningkat ketika rasio antara kecepatan potong dan laju pemakanan berada pada kondisi yang seimbang, sehingga pembentukan chip menjadi lebih terkontrol [16]. Sebaliknya, pada laju






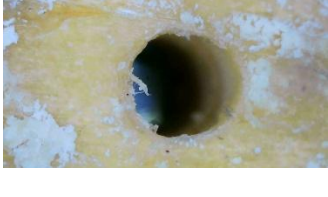
pemakanan tinggi (85 mm/min) burr yang terbentuk terlihat lebih besar dan tidak beraturan. Peningkatan laju pemakanan memperbesar gaya dorong selama proses pengeboran sehingga material di sekitar tepi lubang mengalami deformasi plastis yang lebih signifikan sebelum terjadi pemisahan material. Kondisi ini menyebabkan sebagian material terdorong keluar dan membentuk burr yang lebih menonjol. Hasil ini sejalan dengan beberapa penelitian pemesinan tulang yang melaporkan bahwa peningkatan *feed rate* berhubungan langsung dengan meningkatnya deformasi plastis di sekitar lubang bor [17].










Selain pengaruh individual, hasil pengamatan juga menunjukkan adanya pengaruh interaksi antara kecepatan putar dan laju pemakanan, Pada kecepatan rendah (500 rpm), ketika dikombinasikan dengan laju pemakanan menengah hingga tinggi, morfologi burr cenderung lebih kasar. Ketika kecepatan putar meningkat hingga 1000–1500 rpm, burr yang terbentuk relatif lebih halus. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan putar membantu meningkatkan efisiensi proses pemotongan serta memperbaiki mekanisme pembentukan chip, sehingga deformasi material di sekitar tepi lubang dapat dikurangi. Dengan demikian, interaksi antara laju pemakanan dan kecepatan putar menjadi faktor penting dalam menentukan karakteristik burr yang terbentuk.

Selain parameter pemotongan, penggunaan media pendingin juga memberikan pengaruh terhadap morfologi burr. Pada kondisi pengeboran kering, burr yang terbentuk umumnya lebih kasar dan tidak beraturan dibandingkan dengan kondisi pengeboran menggunakan pendingin. Kehadiran pendingin seperti larutan NaCl maupun *OpSite* diduga mampu mengurangi gesekan antara mata bor dan permukaan tulang serta membantu menjaga stabilitas mekanik material selama proses pemotongan. Kondisi tersebut mengurangi deformasi plastis di sekitar tepi lubang sehingga burr yang terbentuk cenderung lebih kecil dan lebih terkontrol. Hasil ini

konsisten dengan beberapa studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa pendinginan selama pengeboran tulang dapat memperbaiki kualitas lubang serta menurunkan kerusakan permukaan. Pembentukan burr yang berlebihan pada tepi lubang bor berpotensi meningkatkan risiko iritasi jaringan lunak di sekitar area operasi serta dapat mempengaruhi kualitas pemasangan implan ortopedi.

Tabel 2. Morfologi burr yang terbentuk pasca pengeboran pada tepi masuk lubang bor

Run	Kondisi Pengeboran	Morfologi Burr
1	500 rpm, 60 mm/min, NaCl	
2	1500 rpm, 60 mm/min, NaCl	
3	1500 rpm, 60 mm/min, Kering	
4	1500 rpm, 35 mm/min, Opsite	
5	500 rpm, 60 mm/min, Kering	
6	1000 rpm, 35 mm/min, NaCl	

7	500 rpm, 35 mm/min, Opsite	
8	500 rpm, 85 mm/min, Opsite	
9	1000 rpm, 60 mm/min, Opsite	
10	1000 rpm, 60 mm/min, Opsite	
11	1000 rpm, 85 mm/min, Kering	
12	1000 rpm, 60 mm/min, Opsite	
13	1500 rpm, 85 mm/min, Opsite	
14	1000 rpm, 35 mm/min, Kering	
15	1000 rpm, 85 mm/min, NaCl	

Burr dengan dominasi bentuk paling tinggi umumnya dijumpai pada laju pemakanan yang tinggi yaitu 85 mm/min, terutama ketika dikombinasikan dengan kecepatan putar rendah hingga menengah serta tanpa penggunaan cairan pendingin, dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah di mana burr yang terbentuk lebih menonjol, nampak tebal, serta kontinu di sepanjang tepi lubang, morfologi tersebut mengindikasikan bahwa sebelum material terpisah sepenuhnya tulang mengalami deformasi plastis yang cukup luas akibat beban mekanis yang bekerja. Tingginya dominasi ini berkaitan erat dengan peningkatan gaya dorong selama pengeboran berlangsung, laju pemakanan yang besar menyebabkan mata bor menekan material tulang dengan intensitas tinggi dalam kurun waktu yang singkat, sehingga mekanisme pemotongan tidak lagi didominasi oleh pemisahan material secara geser, melainkan oleh deformasi plastis yang mendorong material keluar dari tepi lubang.



Gambar 4. Bentuk burr kontinu lebih tebal dan menonjol pada kondisi pengeboran 500 rpm, 85 mm/min, Opsite Spray

Dilain sisi pada kondisi pengeboran dengan laju pemakanan rendah hingga menengah membentuk burr yang memiliki tingkat lebih kecil, dapat dilihat pada Gambar 5. Dimana burr tampak lebih tipis, berukuran kecil, dan tidak kontinu. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa deformasi plastis pada tepi lubang dapat ditekan, sehingga proses pemisahan material berlangsung lebih stabil dan terkendali.



Gambar 5. Bentuk burr tampak lebih tipis, berukuran kecil, dan tidak kontinu pada kondisi pengeboran 500 rpm, 35 mm/min, Opsite Spray

Selain dari parameter mekanis, penggunaan cairan pendingin juga berperan dalam menentukan tingkat dominasi burr, pada kondisi pengeboran kering burr yang terbentuk cenderung lebih besar dan lebih menonjol dibandingkan dengan kondisi dengan menggunakan cairan pendingin, sebagaimana dilihat pada Gambar 6. Tidak adanya pendinginan ketika pengeboran berlangsung meningkatkan gesekan antar mata bor dengan material tulang serta mempercepat kenaikan temperature saat pengeboran berlangsung yang akhirnya memperbesar deformasi plastis di sekitar tepi lubang dan memperprah pembentukan burr. Burr terlihat lebih kasar, lebih banyak dan juga tidak beraturan bentuknya.



Gambar 6. Bentuk lebih banyak, tidak beraturan, dan kasar pada kondisi pengeboran 1000 rpm, 85 mm/min, Kering

Analisis yang dilakukan hanya pada pengamatan morfologi burr secara visual tanpa melakukan pengukuran kuantitatif terhadap tinggi atau volume burr yang terbentuk. Pendekatan ini dipilih untuk

menekankan identifikasi mekanisme deformasi material pada tepi lubang selama proses pengeboran berlangsung. Dengan demikian, dominansi burr dapat dipandang sebagai representasi visual dari ketidakstabilan proses pengeboran serta tingginya deformasi plastis yang terjadi pada tepi lubang tulang kortikal.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi morfologi burr yang terbentuk selama proses pengeboran tulang kortikal pada tiap kondisi parameter pengeboran. Dari hasil pengamatan morfologi, laju pemakanan menunjukkan pengaruh yang besar terhadap kecenderungan pembentukan burr dibandingkan dengan parameter lainnya. Peningkatan laju pemakanan hingga 85 mm/min cenderung menghasilkan burr yang lebih besar dan tidak beraturan, sedangkan laju pemakanan yang lebih rendah (35–60 mm/min) menghasilkan tepi lubang yang lebih halus dengan pembentukan burr yang lebih kecil.

Interaksi antara laju pemakanan dan kecepatan putar juga mempengaruhi karakteristik burr yang terbentuk. Kombinasi dengan kecepatan putar tinggi yaitu 1000 – 1500 rpm dengan laju pemakanan rendah cenderung menunjukkan morfologi tepi lubang yang stabil dan burr yang lebih minimal. Selain itu, penggunaan media pendingin seperti larutan NaCl dan *Opsite Spray* menghasilkan morfologi burr yang lebih halus dibandingkan kondisi pengeboran kering. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi parameter pengeboran yang tepat berpotensi meningkatkan kualitas tepi lubang pada pengeboran tulang kortikal dan dapat membantu mengurangi risiko iritasi jaringan selama prosedur pemasangan implant berlangsung

Saran

Berdasarkan hasil penelitian diberikan saran sebagai berikut :

1. Pertama, penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji karakteristik burr secara kuantitatif, misalnya melalui pengukuran tinggi atau volume burr menggunakan teknik pemindaian optik atau mikroskopi resolusi tinggi.
2. Penelitian berikutnya dapat memperluas variasi kondisi pengeboran dengan mempertimbangkan geometri mata bor dan sudut ujung potong, serta mengevaluasi respon termal selama proses pengeboran.

Referensi

- [1] Gusri A. Ibrahim, Yanuar Burhanuddin, Andre Firmansyah, Arzaq G. Dityamri, Dewi Sartika, Suryadiwansa Harun, “Enhancing Precision and Reducing Surface Damage in Ti-6Al-4V ELI Cortical Screws through Optimized Polishing Techniques,” *Eng. Lett.*, vol. 33, no. 4, pp. 886–897, 2025.
- [2] M. S. Noorazizi, R. Izamshah, and M. S. Kasim, “Effects of Drill Geometry and Penetration Angle on Temperature and Holes Surfaces for Cortical Bovine Bone: An in Vitro Study,” *Procedia Eng.*, vol. 184, pp. 70–77, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.072.
- [3] Y. Zhang, J. A. Robles-Linares, L. Chen, Z. Liao, A. J. Shih, and C. Wang, “Advances in machining of hard tissues – From material removal mechanisms to tooling solutions,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 172, no. September 2021, p. 103838, 2022, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103838.
- [4] J. A. Robles-Linares, D. Axinte, Z. Liao, and A. Geros, “Machining-induced thermal damage in cortical bone: Necrosis and micro-mechanical integrity,” *Mater. Des.*, vol. 197, p. 109215, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2020.109215.
- [5] T. Chen *et al.*, “Current-carrying contact character and wear behavior

- of an elastic ring at different rolling speeds,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 131, p. 105825, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105825>.
- [6] A. G. Dityamri, G. A. Ibrahim, S. Harun, and Y. Burhanuddin, “Investigatin of drilling parameters affecting borehole circularity in cortical bone,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 18, pp. 71–79, 2024, doi: 10.24853/sintek.18.2.71-79.
- [7] G. Akhyar, A. Hamni, Y. Burhanuddin, and M. Yahya, “Optimization of Machining Parameters on The Geometry Precision of Cortical Screw of Ti-6Al-4V ELI Using Gray Relational Analysis Method,” vol. 14, no. 2, 2024.
- [8] G. A. Ibrahim, Y. Burhanuddin, and D. Emrijakto, “A study on drill machining for Magnesium alloy using Taguchi method,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 857, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/857/1/012014.
- [9] M. R. Effatparvar, N. Jamshidi, and A. Mosavar, “Appraising efficiency of OpSite as coolant in drilling of bone,” *J. Orthop. Surg. Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1186/s13018-020-01710-w.
- [10] Justin, J. L. Cook, C. C. Bozynski, J. D. Tegethoff, K. Kuroki, and B. D. Crist, “Does Irrigating While Drilling Decrease Bone Damage?,” *Iowa Orthop. J.*, vol. 42, no. 2, pp. 22–29, 2022.
- [11] A. K. Kiani, D. Pheby, G. Henehan, R. Brown, P. Sieving, and P. Sykora, “Ethical considerations regarding animal experimentation,” vol. 63, pp. 255–266, 2022.
- [12] G. Lin, H. Shi, X. Liu, Z. Wang, H. Zhang, and J. Zhang, “Tool wear on machining of difficult-to-machine materials: a review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 134, no. 3, pp. 989–1014, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14193-4.
- [13] L. Shu *et al.*, “A novel self-centring drill bit design for low-trauma bone drilling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 154, no. April, p. 103568, 2020, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103568.
- [14] G. A. Ibrahim, A. Hamni, D. A. Falah, Y. Burhanuddin, A. Arifin, and D. Sartika, “Dimensional Error Analysis of Cortical Screw during Threading of Magnesium AZ31,” *J. Adv. Res. Appl. Mech.*, vol. 125, no. 1, pp. 14–26, 2025, doi: 10.37934/aram.125.1.1426.
- [15] S. Song, X. Cheng, M. Shi, G. Zheng, R. Dong, and Z. Mu, “Study of the burr height at hole exit in bone drilling by twist drills,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 236, p. 095441192211241, Sep. 2022, doi: 10.1177/09544119221124170.
- [16] T. Boiadjiev, G. Boiadjiev, K. Delchev, I. Chavdarov, and R. Kastelov, “Feed rate control in robotic bone drilling process,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part H J. Eng. Med.*, vol. 235, no. 3, pp. 273–280, Mar. 2021, doi: 10.1177/0954411920975890.
- [17] K. Alam *et al.*, “Effect of drill quality on biological damage in bone drilling,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 6234, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33381-y.