Jurnal Teknik Mesin Universitas Bandar Lampung, Vol 14 No.2, Oktober 2025

Submitted: 06-10-2025
Revised: 20-10-2025
Submitted: 24-10-2025
Revised: 30-10-2025
Accepted:31-10-2025
Published:31-10-2025

Analisis Pengaruh Kecepatan Potong terhadap Progresivitas Aus dan Mekanisme Kerusakan Mata Bor Ortopedi SS316L pada Proses Pengeboran Tulang Kortikal

Gusri Akhyar Ibrahim, Tarkono, Edo Ferdianto, Yanuar Burhanuddin, Arzaq Guruh Dityamri, Arinal Hamni

Dosen Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung, Dosen Jurusan Teknik Mesin, Universitas Saburai, Bandar Lampung, Indonesia Bandar Lampung, Indonesia
Email: gusri.akhyar@eng.unila.ac.id

Abstrak. Pengeboran tulang kortikal merupakan tahap penting dalam prosedur bedah ortopedi untuk pemasangan implan, di mana peningkatan suhu dan keausan mata bor dapat memengaruhi akurasi serta keamanan operasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan potong terhadap progresivitas aus dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi berbahan SS316L selama proses pengeboran tulang kortikal. Pengujian dilakukan menggunakan tulang kortikal sapi sebagai model biologis yang memiliki sifat mekanik mendekati tulang manusia. Variasi kecepatan potong yang digunakan meliputi 5,027 m/menit, 10,0 m/menit, dan 15,708 m/menit dengan laju pemakanan konstan sebesar 35 mm/menit serta penggunaan cairan pendingin OpSite Spray. Keausan mata bor dievaluasi berdasarkan nilai flank wear (Vb) menggunakan mikroskop digital dan dianalisis dengan perangkat lunak AutoCAD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kecepatan potong 5,027 m/menit, waktu pengeboran hingga mencapai batas keausan 0,2 mm adalah 94,67 menit, sedangkan pada kecepatan 15,708 m/menit waktu tersebut menurun menjadi 38,88 menit. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan potong mempercepat laju keausan akibat kenaikan suhu dan intensitas gesekan pada zona pemotongan. Mekanisme keausan yang dominan adalah keausan abrasif dan adhesif yang dipicu oleh peningkatan energi gesek dan suhu lokal. Dengan demikian, kecepatan potong merupakan parameter kritis yang menentukan umur pakai serta keandalan mata bor ortopedi pada proses pengeboran tulang kortikal.

Kata kunci : Pengeboran tulang kortikal, kecepatan potong, keausan mata bor, SS316L, mata bor ortopedi

1 Pendahuluan

Pengeboran tulang kortikal merupakan tahap penting dalam prosedur bedah ortopedi untuk pemasangan implan dan baut kortikal. Proses ini harus dilakukan secara presisi

karena tulang hanya mampu menahan suhu maksimum sekitar 47°C; jika melebihi batas tersebut, dapat terjadi nekrosis termal yang merusak jaringan sekitarnya [1], [2].

Selain faktor termal, keausan mata bor juga berpengaruh besar terhadap kualitas lubang dan keamanan operasi. Keausan yang meningkat menyebabkan suhu pemotongan lebih tinggi dan menurunkan akurasi pengeboran [3]. Beberapa studi melaporkan bahwa parameter pemotongan seperti kecepatan potong, laju pemakanan, dan sistem pendingin sangat memengaruhi gaya gesek serta umur pakai alat [4], [5].

Namun, penelitian yang secara khusus meninjau pengaruh variasi kecepatan potong terhadap progresivitas aus dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi berbahan SS316L masih terbatas. Padahal, parameter ini sangat penting dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi pemotongan dan keamanan biologis selama operasi ortopedi.

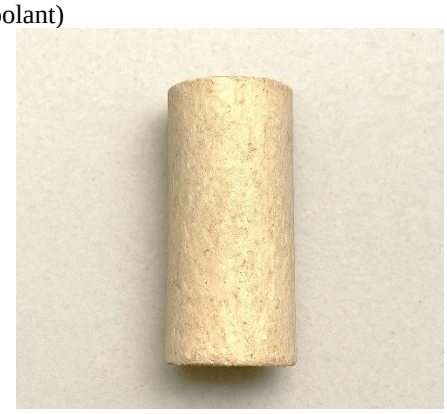
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan potong terhadap laju keausan dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi SS316L pada proses pengeboran tulang kortikal guna menentukan parameter operasi yang optimal dan aman digunakan secara klinis.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Uraikan alat dan bahan yang digunakan. Eksperimen dilakukan menggunakan mesin CNC Milling 3-axis berpresisi tinggi yang dimodifikasi dengan sistem penjepit khusus untuk tulang, Mikroskop Digital USB, Stopwatch Digital, Termometer Infrared, Komputer dengan AutoCAD.

Bahan yang digunakan sebagai berikut: Sampel Tulang Kortikal, Mata Bor Ortopedi, Cairan Pendingin (Coolant)



Gambar 1. Sampel Tulang Kortikal, Tulang Sapi Dewasa.

2.2. Metode

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk mengkaji pengaruh kecepatan potong terhadap progresivitas aus dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi selama pengeboran tulang kortikal. Setiap percobaan dilakukan pada kondisi terkontrol dengan parameter tetap, sehingga hubungan antara variabel bebas dan terikat dapat dianalisis secara kuantitatif.

Penelitian ini dirancang untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan potong terhadap **progresivitas aus dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi** selama proses pengeboran tulang kortikal. Pendekatan yang digunakan adalah **eksperimen laboratorium** dengan metode *controlled cutting test*, di mana setiap variabel diuji secara terpisah dalam kondisi terkontrol. Fokus utama penelitian adalah menentukan hubungan antara kecepatan potong (*cutting speed*) terhadap laju keausan (*flank wear/Vb*) dan karakteristik permukaan mata bor pasca pengeboran.

2.3. Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan kecepatan potong (Vc) sebagai variabel bebas utama, dengan parameter tetap berupa laju pemakanan (feed rate) dan jenis cairan pendingin. Variasi dan parameter eksperimen ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 1. Parameter Eksperimen Pengeboran

Kode	Kecepatan Potong (Vc) [m/menit]	Laju Pemakanan (Vf) [mm/menit]	Pend-ingin	Jumlah Ulangan	Ket-erangan
A	5,027	35	OpSite Spray	3x	Kecepatan rendah
B	10,000	35	OpSite Spray	3x	Kecepatan sedang
C	15,708	35	OpSite Spray	3x	Kecepatan tinggi

2.4. Prosedur Eksperimen

Persiapan Sampel
Tulang yang telah dibersihkan dan dikeringkan dijepit menggunakan clamping device khusus agar posisi stabil selama pengeboran.

Proses Pengeboran
Proses pengeboran dilakukan dengan kecepatan potong sesuai variasi pada Tabel 2. Setiap percobaan dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan untuk meningkatkan reliabilitas data. Pendingin OpSite Spray disemprotkan secara periodik untuk menjaga suhu permukaan di bawah 47°C.

Pengukuran Keausan
Setelah setiap siklus pengeboran, mata bor diamati menggunakan mikroskop digital USB dengan perbesaran 1000x. Citra keausan diambil pada sisi pahat (flank face) dan dianalisis menggunakan perangkat lunak AutoCAD 2024 untuk mengukur nilai flank wear (Vb).

Penentuan Waktu Umur Alat
Waktu pemotongan diukur sejak awal pengeboran hingga mencapai batas keausan kritis Vb = 0,2 mm, sesuai standar ISO 3685 untuk pengujian umur pahat.

Analisis Mekanisme Kerusakan
Citra hasil pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi pola kerusakan mata bor, meliputi abrasi, adhesi, dan oksidasi, dengan membandingkan morfologi permukaan antarvariasi kecepatan potong.

2.5. Analisis Data

Analisis DataData yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk memperoleh hubungan antara kecepatan potong dan laju keausan mata bor. Nilai flank wear diplot terhadap waktu pengeboran untuk setiap variasi kecepatan, menghasilkan kurva progresivitas keausan.
Selain itu, dilakukan analisis kualitatif terhadap foto mikroskopis untuk mengidentifikasi mekanisme dominan yang terjadi pada permukaan pahat.

Hubungan antara waktu pengeboran dan nilai keausan dapat digambarkan menggunakan model empiris sederhana berikut:

$$V_b = F(V_c, t) \tag{1}$$

Keterangan:
V_b = keausan pahat (mm),
V_b = kecepatan potong (m/menit), dan
t = waktu pengeboran (menit).

Analisis ini digunakan untuk menilai kecepatan potong optimum yang menghasilkan keseimbangan antara efisiensi pemotongan dan umur alat maksimum.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Keausan Mata Bor

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan potong terhadap progresivitas aus mata bor ortopedi selama proses pengeboran tulang kortikal. Nilai

keausan flank wear (Vb) diamati hingga mencapai batas 0,2 mm sesuai standar ISO 3685.
Tabel 2 menunjukkan hubungan antara kecepatan potong dengan waktu pengeboran hingga tercapai batas keausan tersebut.

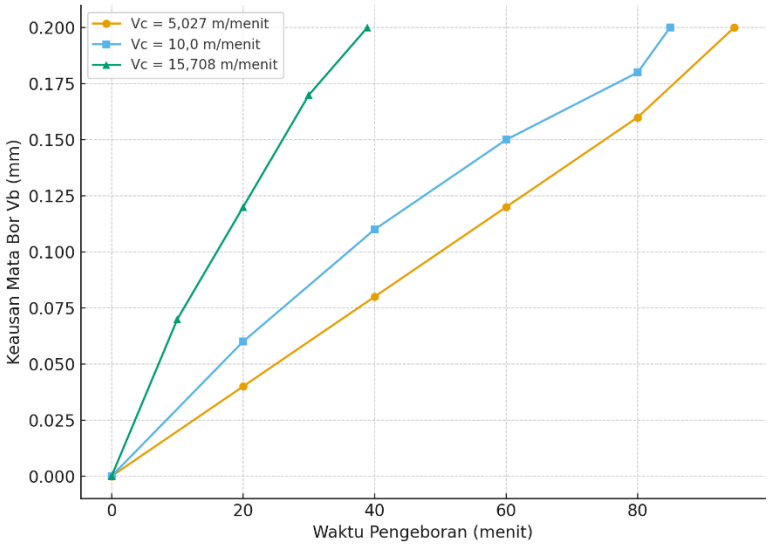
Tabel 2. Hasil Pengujian Keausan Mata Bor Ortopedi SS316L

Kode Untuk Variabel					
No Eksprimen	Kecepatan Potong (*Vc*) m/min	Kecepatan Pemakanan (*Vf)* mm/menit	Cairan Pendingin (L)	Aus Vb mm	Waktu (min)
1	5,027	35	*opsite*	0,2 mm	94,67
2	10,0	35	*opsite*	0,2 mm	84,92
3	15,708	35	*opsite*	0,2 mm	38,88

Dari tabel di atas terlihat bahwa peningkatan kecepatan potong menyebabkan penurunan signifikan terhadap waktu pemotongan hingga mencapai batas keausan. Pada kecepatan rendah (5,027 m/menit), mata bor membutuhkan waktu 94,67 menit untuk mencapai Vb 0,2 mm. Sementara pada kecepatan tinggi (15,708 m/menit), waktu tersebut menurun drastis menjadi 38,88 menit.
Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, semakin cepat progresivitas keausan yang terjadi, yang berkaitan langsung dengan peningkatan gesekan dan suhu pada zona pemotongan.

3.2. Hubungan Keausan terhadap Waktu Pengeboran

Gambar ini menunjukkan hubungan antara nilai *flank wear (Vb)* terhadap waktu pengeboran untuk masing-masing variasi kecepatan potong.



Gambar 2. Hubungan antara Keausan Mata Bor (Vb) dan Waktu Pengeboran pada Berbagai Kecepatan Potong

Berikut penjelasan pada grafik.
Sumbu horizontal (X): waktu pengeboran (menit)
Sumbu vertikal (Y): nilai keausan (Vb, mm)
Tiga kurva menggambarkan Vc = 5,027; 10,000; dan 15,708 m/menit.
Kurva 5,027 m/menit meningkat lambat dan stabil (umur alat panjang).
Kurva 10,000 m/menit menunjukkan kenaikan moderat.
Kurva 15,708 m/menit menanjak tajam (umur alat pendek).

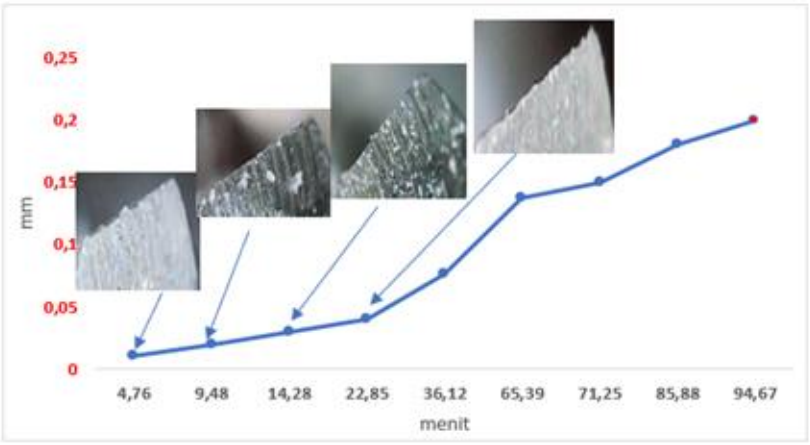
3.3. Analisis Progresivitas Aus

Pola keausan menunjukkan karakteristik non-linear progressive wear. Pada kecepatan rendah, laju keausan relatif stabil karena peningkatan suhu dan gaya gesek masih dapat dikendalikan oleh pendingin. Namun, pada kecepatan tinggi, peningkatan gaya gesek per satuan waktu menyebabkan kenaikan suhu signifikan yang mempercepat deformasi plastis dan oksidasi lokal pada sisi pahat.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip tribologi pemotongan. Peningkatan kecepatan potong meningkatkan energi gesek yang berdampak pada naiknya suhu di daerah kontak antara pahat dan tulang. Akibatnya, terjadi **softening lokal** pada ujung mata bor SS316L, yang memicu keausan abrasif dan adhesif lebih cepat.

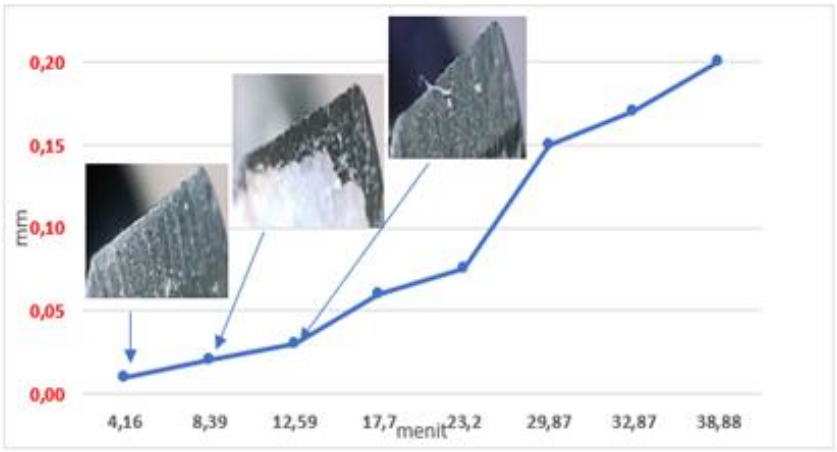
3.4. Pengamatan Morfologi Keausan

Citra hasil pengamatan mikroskop digital menunjukkan perubahan morfologi yang signifikan pada permukaan pahat untuk setiap variasi kecepatan potong.



Gambar 3. Morfologi Mata Bor Setelah Pengeboran pada Vc = 5,027 m/menit

Terlihat adanya goresan halus dan partikel tulang yang sedikit menempel pada ujung pahat. Keausan didominasi oleh mekanisme **abrasi ringan**, dengan kerusakan tepi minimal.

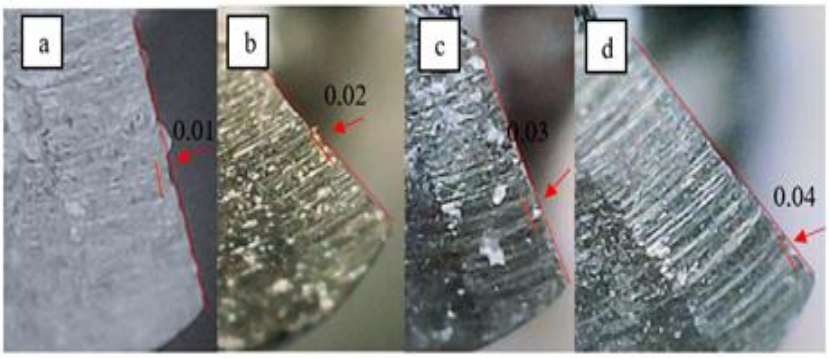


Gambar 4. Morfologi Mata Bor Setelah Pengeboran pada Vc = 15,708 m/menit
Terlihat perubahan warna permukaan akibat oksidasi serta perlekatan serpihan tulang yang lebih banyak. Mekanisme dominan adalah **abrasi berat dan adhesi**, yang menunjukkan peningkatan gaya gesek dan suhu permukaan tinggi.

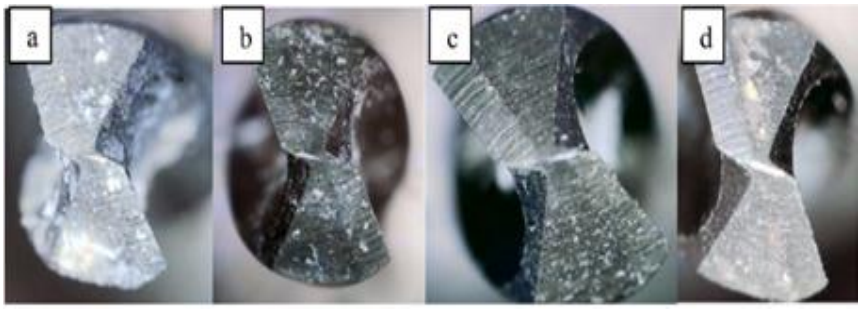
3.5. Diskusi Hasil

Hasilnya menunjukkan bahwa kecepatan potong 5,027 m/min memberikan umur pakai mata bor lebih lama yakni 94,67 menit, ini menunjukkan pemakaian kecepatan potong rendah dapat mengurangi keausan mata bor karena gesekan dan suhu yang lebih rendah.

Sebaliknya, dengan kecepatan potong 15,708 m/min umur pakai mata bor hanya 38,88 menit. Kecepatan yang lebih tinggi meningkatkan gesekan dan suhu yang dapat mempercepat keausan mata bor [17]. Aus pada permukaan mata bor yang meluas juga terjadi akibat gesekan yang terus menerus, menyebabkan permukaan mata bor menjadi lebih tipis secara bertahap dapat dilihat dalam gambar 4 dan 5. Menggunakan kecepatan potong 5,027 m/min ini memperlihatkan bagian mata bor terdapat sedikitnya partikel tulang yang menempel pada ujung mata bor. Hal ini memungkinkan keterkaitan adanya nilai parameter kecepatan potong yang rendah, selain itu juga terdapat goresan kecil pada ujung mata bor yang terjadi akibat dari pengeboran. Aus yang meluas ini tidak hanya mengurangi efisiensi pengeboran, tetapi juga dapat menyebabkan perubahan dimensi lubang yang diinginkan. Mata bor yang semakin rusak menandakan efek abrasi kontinu selama dalam proses pengeboran, ini terjadi gesekan saat interaksi antara mata bor dengan tulang yang dapat menyebabkan abrasi pada mata mata bor. Mata bor akan terus mengalami keausan pada tepi potongnya seiring berjalannya waktu pengeboran.



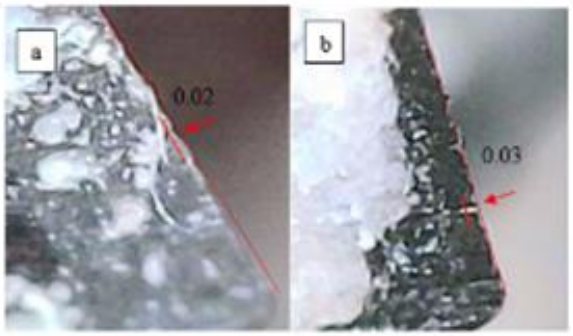
Gambar 5. kerusakan mata pahat pada Vc = 5,027 m/min



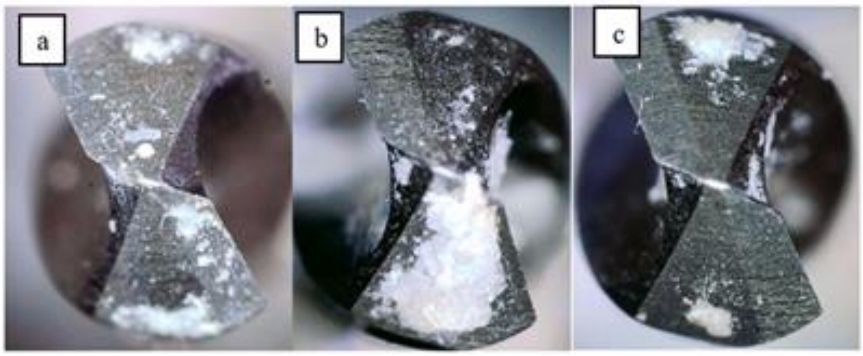
Gambar 6. Perubahan aus pada mata bor dengan lama waktu pengeboran pada Vc = 5,027 m/min (a. 4,76 menit, b. 9,48 menit, c. 14,28menit, d. 22,85 menit)

Adanya perlekatan material tulang pada kecepatan potong tinggi tersebut dapat menunjukkan meskipun adhesi masih terjadi, gejala abrasi berupa goresan yang signifikan dan fouling dalam bentuk akumulasi partikulat tulang tidak terlalu dominan. Hal ini memungkinkan bahwa pada kecepatan potong tinggi, terdapat mekanisme self-

cleaning parsial atau perubahan karakteristik termal pada zona pemotongan yang mengurangi efek penumpukan material secara berlebihan di permukaan pahat. Dengan demikian, meskipun masih ditemukan bukti adhesi, tingkat keausan abrasif dan fouling pada permukaan mata bor relatif lebih rendah dibandingkan dengan kondisi kecepatan potong yang lebih rendah



Gambar 7. kerusakan pahat Kecepatan Potong pada Vc =15,708 m/min



Gambar 8. Perubahan pada mata pahat dengan lama waktu pengeboran pada Vc = 15,027 m/min : (a. 4,16menit, b. 8,39 menit, c. 12,59 menit)

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa **kecepatan potong memiliki pengaruh signifikan terhadap progresivitas aus dan mekanisme kerusakan mata bor ortopedi SS316L** pada proses pengeboran tulang kortikal. Peningkatan kecepatan potong menyebabkan kenaikan suhu dan gaya gesek pada zona pemotongan, yang mempercepat terjadinya keausan abrasif dan adhesif pada sisi pahat. Pada kecepatan rendah sebesar 5,027 m/menit, waktu pengeboran hingga mencapai batas keausan 0,2 mm tercatat paling lama, yaitu 94,67 menit, menunjukkan umur pakai alat tertinggi dan kondisi pemotongan yang lebih stabil secara termal. Sebaliknya, pada kecepatan tinggi 15,708 m/menit, waktu tersebut menurun menjadi 38,88 menit, menandakan percepatan keausan akibat peningkatan suhu dan deformasi

plastis pada permukaan pahat. Oleh karena itu, kecepatan potong yang rendah direkomendasikan untuk menjaga presisi pengeboran, memperpanjang umur alat, serta mengurangi risiko kerusakan termal pada jaringan tulang selama prosedur bedah ortopedi.

References

1. L. Shihao, L. Shu, T. Kizaki, W. Bai, M. Terashima, and N. Sugita, "Cortical bone drilling: A time series experimental analysis of thermal characteristics," *J. Manuf. Process.*, vol. 64, pp. 606–619, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.046.
2. K. Alam, Y. Mitra, S. Shukla, and M. Rahman, "Effect of drill quality on biological damage in bone drilling," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33381-y.
3. T. Staroveski, T. Zizak, M. Klaic, and D. Brezak, "Influence of High-Speed Bone Drilling on Drill Bit Wear Intensity and Heat Generation," *Int. J. New Technol. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 16–20, 2020, doi: 10.31871/ijntr.6.1.16.
4. J. G. Tsiagadigui, B. Ndiwe, M. A. Ngo Yamben, N. Fotio, F. E. Belinga, and E. Njeugna, "The effects of multiple drilling of a bone with the same drill bit: Thermal and force analysis," *Heliyon*, vol. 8, no. 2, p. e08927, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08927.
5. 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.
6. L. Shu, S. Li, W. Bai, and N. Sugita, "A novel self-centring drill bit design for low-trauma bone drilling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 154, no. 4, p. 103568, 2020, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103568.
7. J. Zuo, Y. Lin, and M. He, "An investigation of the adhesive effect on the flank wear properties of a WC/Co-based TiAlN-coated tool for milling a Be/Cu alloy," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 4, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3390/met9040444.
8. G. A. Ibrahim, T. Tarkono, and Y. Burhanuddin, "Mekanisme Aus Pahat Putar pada Pemesinan Magnesium AZ31," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 11, no. 2, pp. 151–158, 2020.
9. A. Saputra and S. M. Yunus, "Mekanisme Kegagalan Pahat pada Proses Milling akibat Aliran Serpihan Pemesinan Kecepatan Tinggi AISI 4140," *J. Tek. Mesin Inst. Teknol. Medan*, vol. 3, no. 2, pp. 55–61, 2017.
10. G. A. Ibrahim, A. Hamni, and Y. Burhanuddin, "Optimasi Parameter Pemesinan Ulir Ti-6Al-4V ELI terhadap Jarak Pitch dan Sudut Ulir menggunakan Metode Taguchi," *Pros. SNTTM*, pp. 13–14, 2022.