

Pengaruh penggunaan cairan pendingin terhadap keausan dan kerusakan pahat bor pada proses pengeboran tulang kortikal

Gusri Akhyar Ibrahim¹, Arinal Hamni², Muhardi Danu, Achmad Yahya¹, Arzaq Guruh Dityamri²

¹Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung, 35145

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Sang Bumi Ruwa Jurai, Bandar Lampung 35145

²Email korespondensi: arzaqguruh14@gmail.com

Abstract. Pengeboran pada tulang kortikal merupakan prosedur yang umum dilakukan dalam praktek bedah ortopedi, terutama pada pemasangan implant. Salah satu kendala dalam proses pengeboran ini adalah meningkatnya suhu akibat interaksi antara pahat bor dan benda kerja tulang. Kenaikan suhu yang berlebih dapat memicu kerusakan termal dan nekrosis pada tulang. Oleh karena itu, penggunaan cairan pendingin banyak dikaji sebagai solusi untuk menekan peningkatan suhu selama proses pengeboran berlangsung serta mengurangi keausan pada pahat bor. Penelitian ini secara khusus menelaah pengaruh dari dua jenis cairan pendingin, yaitu larutan NaCl dan Opsite spray, terhadap mekanisme keausan serta kerusakan mata bor selama proses pengeboran tulang kortikal berlangsung. Eksperimen ini dilakukan menggunakan mesin CNC milling 3-axis dengan kecepatan putar 1500 rpm dan laju pemakanan 35 mm/min, serta tiga kondisi pengeboran dibandingkan, yaitu tanpa menggunakan cairan pendingin (kering), dengan larutan NaCl, dan Opsite spray. Spesimen yang digunakan merupakan tulang kortikal sapi. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa penggunaan cairan pendingin mampu secara signifikan menekan tingkat keausan pahat bor dibandingkan dengan kondisi pengeboran kering. Dari kedua jenis pendinginan yang diuji, larutan NaCl menunjukkan kinerja terbaik dengan tingkat keausan terkecil, yaitu 0,041 mm pada menit ke-16,7, diikuti oleh Opsite spray dengan nilai 0,048 pada menit ke-16,7, sedangkan pengeboran dengan kondisi kering menghasilkan keausan pahat bor yang paling parah, yaitu 0,064 pada menit yang sama. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan pendinginan, khususnya NaCl, berperan penting dalam memperpanjang umur pakai pahat bor serta mengurangi risiko kerusakan termal pada jaringan tulang.

Keywords: Pengeboran tulang kortikal, pendinginan, keausan pahat bor, aplikasi ortopedi

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/vwkyjm67>

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur pada bidang biomedis telah menunjukkan banyak kemajuan dalam dua dekade terakhir. Salah satu bidang yang mendapatkan perhatian khusus ialah proses pemesinan terhadap tulang. Proses pemesinan tulang umumnya melibatkan beberapa teknik seperti frais, pengeboran, ataupun penggerindaan dengan tujuan untuk menghasilkan dimensi yang presisi serta kualitas permukaan yang sesuai dengan standar medis [1]. Di antara berbagai metode pemesinan, pengeboran tulang merupakan salah satu prosedur yang paling kritis dalam praktik ortopedi, khususnya pada tahap pemasangan implan maupun fiksasi internal untuk menstabilkan tulang yang mengalami fraktur. Proses pengeboran ini menuntut ketelitian yang tinggi serta kehati-hatian yang konsisten, karena interaksi langsung antara mata bor dan permukaan tulang berpotensi menimbulkan peningkatan suhu yang signifikan [2]. Kenaikan temperatur pada area kontak akibat gesekan antara alat potong dan tulang, apabila tidak terkendali, dapat mengakibatkan terjadinya nekrosis termal. Kondisi ini berimplikasi serius, karena selain dapat merusak jaringan di sekitar area operasi, juga berpotensi memperlambat proses penyembuhan, bahkan menurunkan kualitas integrasi implan dengan tulang pasien. Oleh sebab itu, kajian yang mendalam

mengenai mekanisme interaksi parameter pemesinan, teknik pengeboran, serta kontrol kondisi operasi menjadi kebutuhan mendesak dalam memastikan keberhasilan prosedur bedah ortopedi.

Oleh karena itu, pengendalian suhu pada proses pengeboran terhadap tulang menjadi faktor krusial dalam menjamin keberhasilan operasi. Beberapa penelitian terdahulu telah menjelaskan bahwa kenaikan suhu dipengaruhi oleh parameter pemotongan, jenis pahat dan juga kondisi pendinginan seperti yang dilakukan oleh Shakouri [1] dan juga Wang [1]. Adapun beberapa media pendinginan untuk menjaga suhu dan mengurangi keausan pahat pada pengeboran telah diuji mulai dari NaCl, hidrogeal, hingga Opsite spray, dengan hasil yang bervariasi [2][3][4]. Namun demikian, penelitian yang secara khusus membandingkan penggunaan NaCl dan Opsite pada pengeboran tulang kortikal untuk melihat keausan pada pahat masih terbatas. Selain itu, keausan pahat juga dinilai menjadi perhatian khusus dikarenakan dapat memengaruhi kualitas pengeboran, akurasi dimensi, serta risiko tambahan pada jaringan tulang [5][6][7]. Dengan demikian, dipandang perlu dilakukan kajian eksperimental yang mampu mengidentifikasi pengaruh variasi pendingin terhadap umur pahat pada pengeboran tulang kortikal.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perbandingan

antara NaCl dan Opsite spray sebagai media pendingin pada proses pengeboran tulang kortikal ditinjau dari keausan pahat bor yang digunakan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam penurunan suhu pemotongan sewaktu proses pengeboran berlangsung sehingga tidak merusak jaringan saraf di sekitar tulang. Hal ini menawarkan keamanan pada prosedur bedah ortopedi karena memiliki biokompatibilitas yang baik dan tidak merusak lingkungan.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Proses Produksi dengan menggunakan mesin Computer Numerical Control (CNC) milling 3 axis merek Borui CNC dengan kecepatan spindel maksimal 8000 rpm, laju pemakanan 1 – 10000 mm/min, dan dimensi keseluruhan Borui CNC 2400 mm x 2000 mm x 2550 mm. Pahat bor yang digunakan adalah pahat bor

khusus ortopedi drill bit berbahan stainless 316L dengan diameter 3,2 mm, panjangnya 150 mm dan sudut pahat bor 50°, sedangkan materialnya adalah tulang kortikal sapi dengan dimensi panjang 80 mm, lebar 30 mm dan ketebalan 8 mm. Selanjutnya, jenis cairan pendingin yang digunakan adalah NaCl dan Opsite spray. Pemesinan dilakukan dengan cara membuat lubang. Sedangkan pengukuran keausan pahat bor dilakukan menggunakan mikroskop USB setelah setiap tahap pengeboran selesai. Variasi perlakuan dalam pendinginan yang digunakan terdiri atas tiga kondisi, yaitu pengeboran dengan cairan NaCl, pengeboran dengan Opsite Spray, dan juga tanpa pendingin. Pemberian cairan pendingin dilakukan secara manual dengan jarum suntik, diarahkan ke ujung pahat ketika proses pengeboran dimulai. Parameter pemotongan dijaga tetap konstan yakni 1500 rpm dengan laju pemakanan 35 mm/min [8], sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pemotongan yang terdiri 3 faktor dan masing-masing 3 faktor

No	Kecepatan Putar (rpm)	Laju Pemakanan (mm/min)	Cairan pendingin (L)
1	1500	35	Opsite
2	1500	35	NaCl
3	1500	35	Kering

Keausan pahat bor (*flank wear*) atau keausan tepi diamati dengan memanfaatkan pembesaran menggunakan mikroskop USB, kemudian citra hasil gambar yang didapatkan dilakukan pembesaran untuk mendapatkan kawasan yang mengalami keausan, sehingga dapat dilakukan pengukuran keausan pahat (V_b). Sedangkan waktu pengeboran (t) dicatat menggunakan stopwatch untuk masing-masing variasi pendinginan. Serangkaian metode ini dirancang guna menelaah pengaruh metode pendinginan terhadap keausan tepi pahat bor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian memperlihatkan kecenderungan peningkatan keausan pahat bor pada setiap kondisi pengeboran, baik dengan variasi cairan pendingin maupun kering. Nilai flank wear (V_b) diperoleh melalui pengukuran mikroskopis menggunakan mikroskop USB setelah 25 menit pengeboran. Seiring bertambahnya waktu pemesinan, nilai V_b terus bertambah akibat akumulasi gesekan berulang antara pahat dan tulang. Gesekan yang berlangsung dalam durasi panjang menghasilkan panas berlebih, sehingga mempercepat degradasi ketajaman pada pahat bor dan pada akhirnya memperpendek umur pakai alat. Berikut merupakan gambar hasil dari kondisi pengeboran kering.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai V_b mengalami peningkatan bertahap sesuai dengan

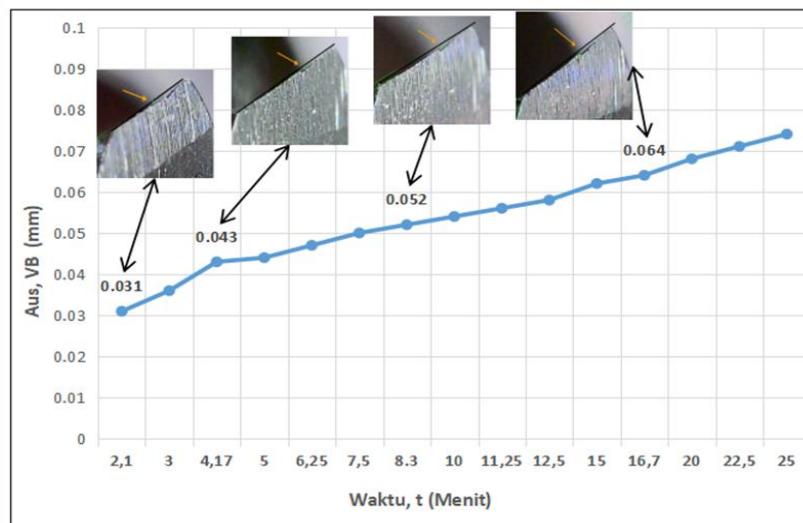
lamanya waktu pemesinan. Pada awal proses, yakni menit ke-2,1, nilai keausan tercatat 0,031 mm, kemudian naik menjadi 0,043 mm pada menit ke-4,17. Tren ini berlanjut hingga mencapai 0,052 mm pada menit ke-8,3 dan 0,064 mm pada menit ke-16,7. Setelah 25 menit pengeboran, nilai V_b mencapai 0,074 mm, menandakan peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan dengan fase awal. Kecenderungan linier dari kurva mengindikasikan bahwa gesekan berulang antara mata pahat dan permukaan tulang menjadi faktor dominan dalam mempercepat keausan. Tidak adanya pendinginan menyebabkan panas yang dihasilkan dari kontak gesek tidak dapat diredam, sehingga memperbesar temperatur pada zona pemotongan. Peningkatan suhu ini dapat mengakibatkan pelunakan material pahat di area tepi serta mengurangi kekerasan relatifnya, yang pada akhirnya mempercepat terjadinya *flank wear*.

Selain itu, kondisi kering memperburuk proses keluarnya burr. Burr yang menumpuk pada alur mata bor menambah gaya gesek dan meningkatkan temperatur lokal, sehingga keausan tidak hanya terjadi pada tepi potong, tetapi juga berpotensi memicu mikropitting serta retakan mikro. Jika hal ini dibiarkan berlanjut, maka pahat akan mencapai batas keausan standar ($V_b = 0,3$ mm) dalam waktu yang relatif singkat, sehingga umur pakai alat berkurang secara drastis, bahkan bisa mengalami kegagalan. Pengeboran dengan kondisi kering bukan hanya memperpendek

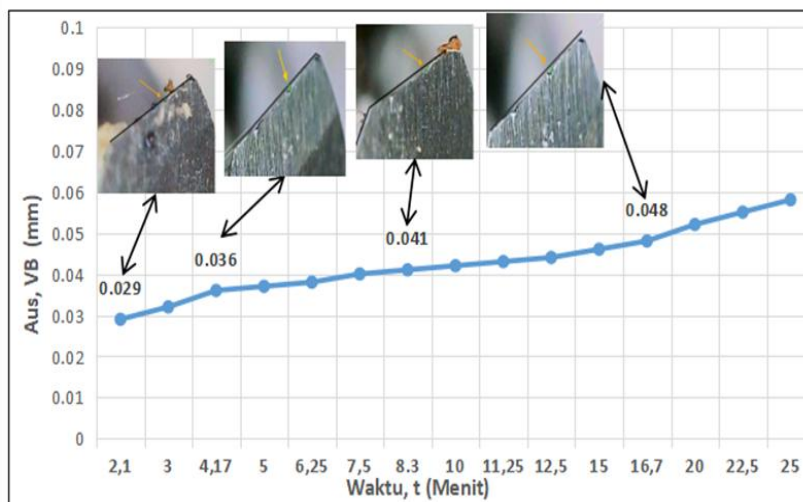
masa pakai pahat, tetapi juga berisiko menimbulkan kerusakan termal pada jaringan tulang, seperti nekrosis termal, yang dapat mengganggu proses penyembuhan pascaoperasi.

Gambar 2 menunjukkan progres aus pahat potong selama 25 menit pemotongan tulang kortikal menggunakan pendingin jenis Optise yang disemprotkan ke arah mata pahat. Jika hasil aus potong pada pemesian menggunakan opsite dibandingkan dengan kondisi pemotongan kering, maka terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan. Pada kondisi kering, keausan pahat cenderung meningkat

lebih cepat, ditandai dengan nilai VB 0,064 mm dalam waktu 16 menit, sementara pada pemesian menggunakan opsite, keausan pahat hanya mencapai 0,048 mm. Hal ini dapat dijelaskan karena tidak adanya media pendingin yang mampu mereduksi gesekan maupun temperatur pada zona potong, sehingga panas yang timbul terakumulasi langsung pada pahat dan benda kerja. Akumulasi panas inilah yang mempercepat mekanisme degradasi tepi potong, baik melalui keausan abrasif, adhesif, maupun difusi termal [9] [10].



Gambar 1. Progres keausan pahat bor dalam kondisi pengeboran kering



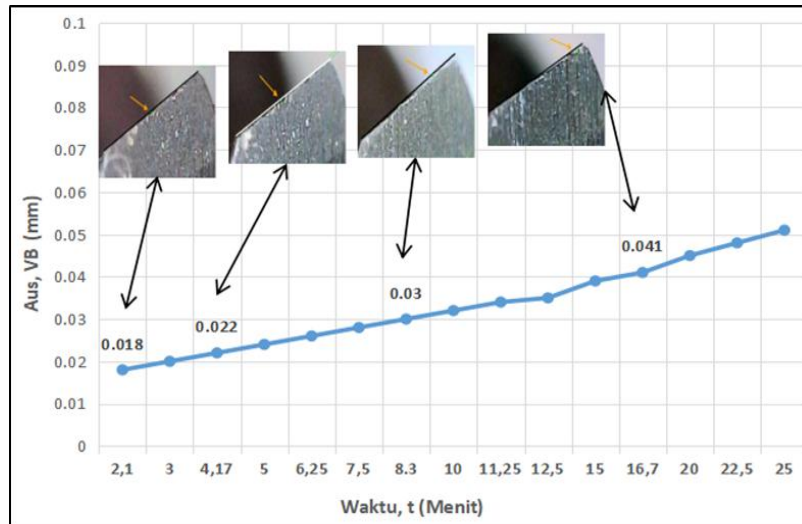
Gambar 2. Progres keausan pahat bor dalam kondisi pengeboran menggunakan cairan Opsite Spray

Sementara itu, pada pengiboran tulang kortikal menggunakan cairan pendingin Opsite, terlihat bahwa secara umum kecenderungan kenaikan keausan lebih terkendali. Meskipun peningkatan VB tetap terjadi secara progresif, laju pertumbuhan keausan relatif lebih lambat dibandingkan dengan kondisi kering. Pada saat pemesian mencapai 8,3 menit, nilai VB

berada di kisaran 0,041 mm, sedangkan pada kondisi kering nilai VB sudah mencapai 0,052. Dapat dikatakan bahwa efek perlambatan ini menunjukkan bahwa Opsite berperan penting dalam menurunkan temperatur di daerah pemotongan serta mengurangi gaya gesekan antara mata pahat dan material kerja. Dengan demikian, umur pakai pahat dapat

diperpanjang, dan kualitas permukaan hasil pemotongan lebih mudah dijaga sesuai standar yang diinginkan. Perbandingan ini secara jelas menegaskan bahwa penggunaan media pendingin bukan hanya sekadar

faktor tambahan, melainkan variabel kunci dalam strategi pemotongan yang berorientasi pada keandalan proses [11].



Gambar 3. Progres keausan pahat bor dalam kondisi pengeboran dengan cairan NaCl

Pada tahap awal pengeboran, pada saat pemotongan sebesar 2,1 menit, nilai keausan yang terukur masih sangat kecil, yakni sekitar 0,018 mm. Kondisi ini menggambarkan bahwa interaksi antara pahat dan benda kerja masih berada dalam fase stabil. Seiring bertambahnya waktu pemotongan, keausan mulai menunjukkan kecenderungan peningkatan yang relatif besar. Pada menit ke-4,17, lebar keausan (VB) tercatat sebesar 0,022 mm, dan kemudian bertambah menjadi 0,030 mm saat proses mencapai menit ke-10. Peningkatan yang berlangsung secara bertahap ini memperlihatkan bahwa penggunaan NaCl cukup efektif dalam mereduksi panas pada zona potong, sehingga pertumbuhan keausan tidak terjadi secara drastis. Memasuki menit ke-16,7, nilai VB mencapai 0,041 mm, angka yang masih dapat dikategorikan moderat untuk durasi pemotongan tersebut. Dokumentasi visual yang disertakan pada grafik turut memperkuat temuan ini, di mana terlihat adanya perubahan bertahap pada morfologi tepi pahat, dengan tanda-tanda pengikisan yang semakin nyata pada area kerja pahat [12]. Bila dibandingkan dengan hasil yang diperoleh melalui penggunaan cairan pendingin *Opsite*, terlihat adanya perbedaan pola keausan. Proses dengan NaCl menghasilkan nilai awal keausan yang lebih rendah (0,018 mm) dibandingkan dengan *Opsite* (0,029 mm).

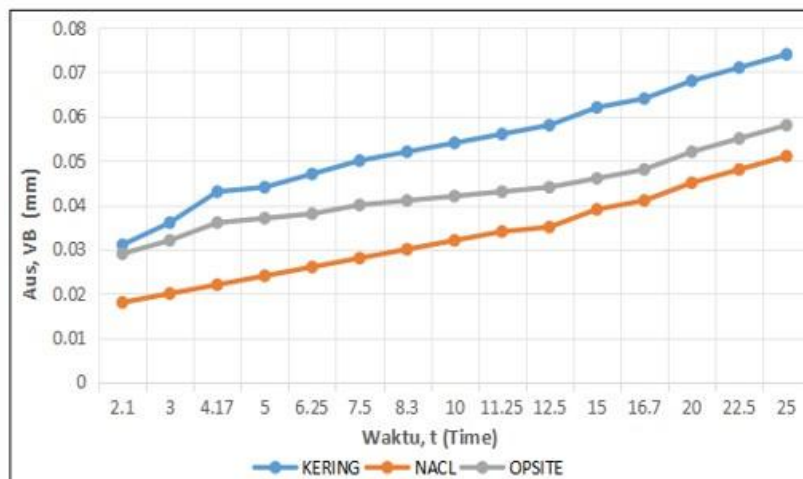
Hal ini menunjukkan bahwa NaCl mampu memberikan perlindungan lebih baik pada fase awal pemotongan, kemungkinan besar karena sifatnya yang mendukung peningkatan konduktivitas termal sehingga pelepasan panas dari zona potong berlangsung lebih cepat. Meskipun demikian, pada

fase pertengahan hingga akhir proses, kecenderungan kenaikan keausan menunjukkan kesamaan dengan kondisi menggunakan *Opsite*. Dengan kata lain, keunggulan NaCl lebih menonjol pada tahap awal, sedangkan pada durasi pemotongan yang lebih panjang, performanya relatif mendekati hasil yang dicapai oleh *Opsite*. Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan media pendingin berpengaruh signifikan terhadap perilaku keausan pahat. NaCl dapat dianggap lebih unggul dalam menjaga kestabilan pahat pada tahap awal pemotongan, sehingga cocok diterapkan untuk proses pemotongan dengan durasi pendek hingga menengah. Sebaliknya, *Opsite* menunjukkan kelebihan pada kemampuan menjaga konsistensi performa pahat pada durasi pemotongan yang lebih panjang. Perbandingan ini membuka ruang untuk strategi optimasi pemilihan cairan pendingin yang lebih spesifik, menyesuaikan dengan kebutuhan proses, jenis material kerja, dan target kualitas hasil pemotongan.

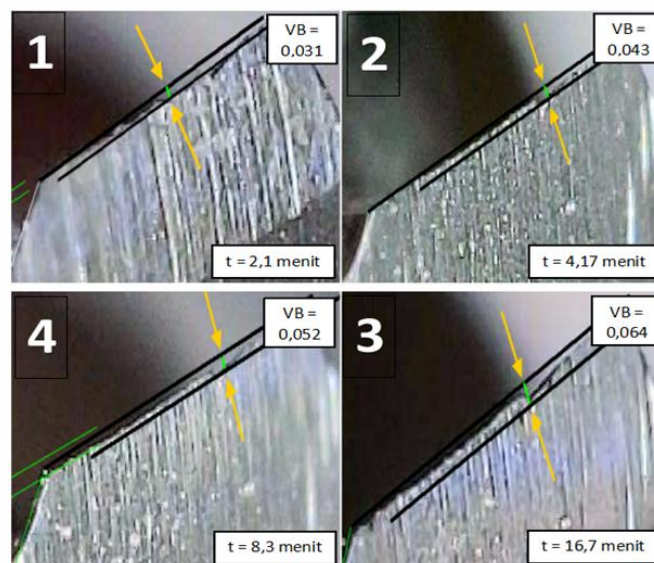
Gambar 4 menunjukkan perbandingan perkembangan keausan pahat bor pada tiga kondisi pengeboran, yaitu tanpa pendingin (kering), dengan cairan pendingin NaCl, serta dengan *Opsite Spray*. Secara umum, seluruh kurva menunjukkan pola peningkatan keausan (*flank wear*) VB yang bersifat progresif seiring bertambahnya waktu pemotongan. Pada pengeboran dengan kondisi kering, keausan pahat tercatat paling tinggi sepanjang proses. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak adanya media pendingin menyebabkan akumulasi panas di zona potong berlangsung secara langsung pada pahat maupun benda kerja. Akumulasi panas tersebut mempercepat degradasi tepi potong, sehingga nilai VB meningkat

lebih cepat dibandingkan dengan penggunaan pendingin. Sebaliknya, penggunaan NaCl dan Opsite Spray terbukti mampu menekan laju keausan secara signifikan. Pada fase awal pemotongan, NaCl menunjukkan kinerja yang lebih baik dengan nilai keausan relatif lebih rendah dibandingkan dengan kondisi lainnya. Hal ini diduga terkait dengan sifat NaCl yang mampu meningkatkan konduktivitas termal

serta mempercepat pelepasan panas dari zona potong. Sementara itu, Opsite Spray menunjukkan kestabilan performa yang lebih konsisten pada durasi pemotongan yang lebih panjang. Meskipun pada tahap awal nilai keausannya berada sedikit di atas NaCl, Opsite cenderung menjaga laju peningkatan keausan tetap moderat hingga akhir proses.



Gambar 4. Progres keausan pahat bor dalam tiga kondisi pengeboran yaitu kondisi kering, dengan NaCl, dan Opsite Spray



Gambar 5. Jenis keausan pahat bor tanpa cairan pendingin (kering)

Perbandingan ketiga kondisi tersebut menunjukkan bahwa NaCl lebih unggul dalam menjaga ketahanan pahat pada pemotongan berdurasi pendek hingga menengah, sedangkan Opsite Spray lebih efektif dalam mempertahankan kestabilan pahat pada pemotongan dengan durasi panjang. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan media pendingin bukan sekadar faktor tambahan, melainkan merupakan variabel kunci dalam menentukan keberhasilan proses pemesinan. Dengan pemilihan pendingin yang tepat, umur pahat dapat

diperpanjang, kualitas permukaan dapat ditingkatkan, dan efisiensi proses pemotongan dapat dicapai secara lebih optimal [8].

Berdasarkan hasil pengamatan visual, tampak adanya perubahan permukaan yang menonjol seiring berjalannya proses pemotongan. Permukaan spesimen menunjukkan pola alur memanjang yang sejajar dengan arah gesekan, disertai dengan pengikisan material pada lapisan permukaan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Gejala ini

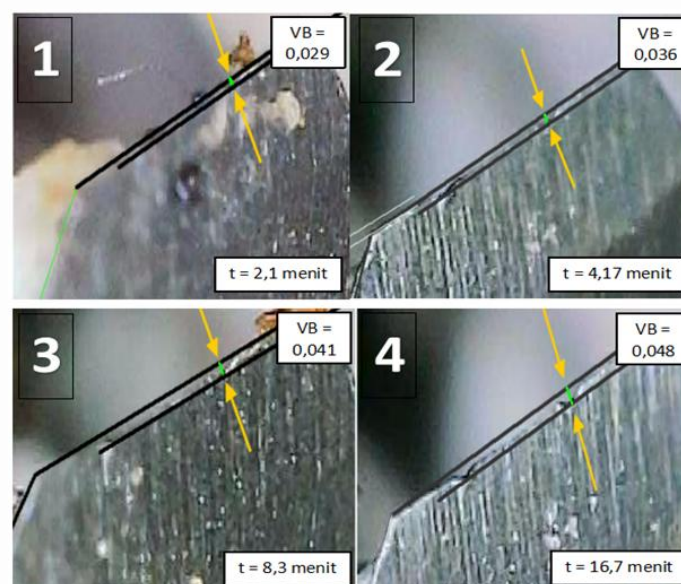
mempresentasikan jenis keausan abrasif (*abrasive wear*), yakni mekanisme keausan yang ditimbulkan oleh partikel keras atau asperitas permukaan lawan yang secara berulang menggores dan mengikis permukaan pahat bor. Selain itu, pada beberapa area permukaan juga teridentifikasi adanya pengelupasan lapisan tipis material yang menghasilkan partikel aus berukuran kecil. Fenomena ini merupakan ciri khas keausan adhesif (*adhesive wear*), di mana terjadi perlekatan lokal pada titik kontak akibat tekanan gesek yang tinggi, kemudian terlepas [13].

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pahat bor yang bekerja pada kondisi pemotongan kering bersifat keausan abrasif, yang ditandai dengan terbentuknya alur memanjang akibat gesekan, namun disertai pula indikasi keausan adhesif dalam bentuk pengelupasan material dan partikel aus halus pada permukaan. Temuan ini menegaskan bahwa interaksi antara gaya gesek, kondisi pemotongan, serta tidak adanya media pendingin berperan penting dalam mempercepat laju degradasi permukaan pahat.

Gambar 6 menunjukkan permukaan yang mengalami keausan, di mana penggunaan cairan Opsite

menunjukkan perkembangan keausan pahat bor yang terjadi secara bertahap seiring bertambahnya waktu pemesian. Jenis keausan pahat bor yang terlihat dapat dikatakan membentuk pola alur abrasif semakin jelas terlihat, diikuti kemunculan pengelupasan tipis yang menghasilkan partikel aus, menandakan keterlibatan keausan adhesif akibat perlekatan material benda kerja pada permukaan pahat.

Pada tahap lanjutan ($t = 16,7$ menit; $VB = 0,048$ mm), gambar pahat menunjukkan intensifikasi mekanisme ganda, dengan goresan abrasif yang lebih rapat dan indikasi adhesif yang semakin nyata melalui pengelupasan material pada zona aktif pemotongan. Meskipun demikian, tingkat keausan yang terjadi masih berada pada kategori moderat jika dibandingkan dengan pengeboran kering, sehingga dapat disimpulkan bahwa Opsite Spray berperan efektif dalam memperlambat laju keausan melalui pengendalian panas pada zona potong, memperpanjang umur pahat, serta menjaga konsistensi kualitas permukaan hasil pemesian.



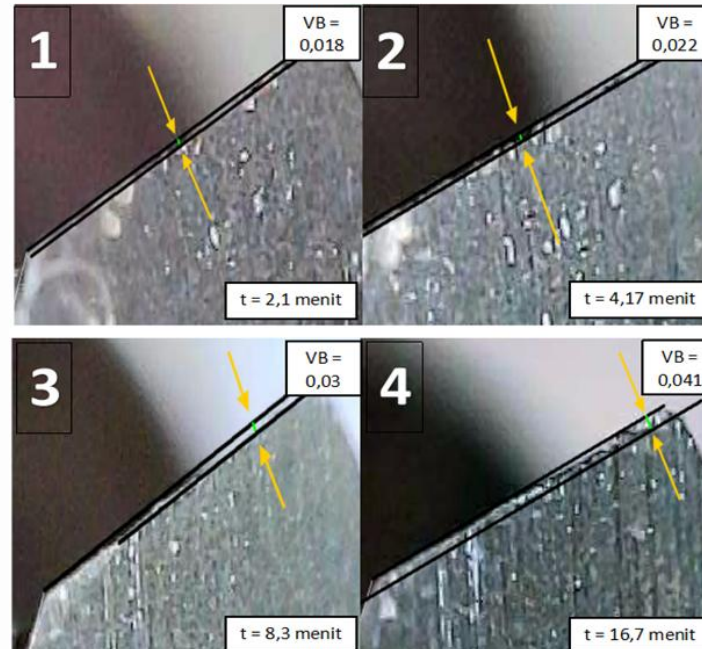
Gambar 6. Jenis keausan pahat bor dengan kondisi pengeboran menggunakan Opsite Spray

Berdasarkan hasil pengamatan, penggunaan NaCl sebagai cairan pendingin memperlihatkan pola keausan yang relatif lebih terkendali dibandingkan dengan kondisi kering maupun Opsite Spray, terutama pada fase awal pemotongan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Pada menit ke-2,1 dengan nilai $VB = 0,018$ mm, permukaan pahat hanya menunjukkan goresan sangat halus yang mengindikasikan mekanisme keausan abrasif dalam skala ringan. Ketika waktu pemotongan mencapai menit ke-4,17 ($VB = 0,022$ mm), intensitas keausan abrasif mulai meningkat, ditandai dengan alur sejajar arah gesek yang lebih jelas, namun masih dalam batas moderat

berkat peran NaCl dalam mempercepat pelepasan panas dari zona potong. Memasuki menit ke-8,3 ($VB = 0,030$ mm), permukaan pahat menunjukkan indikasi tambahan berupa pengelupasan material tipis. Hal ini menegaskan keterlibatan keausan adhesif akibat perlekatan antara pahat dan material benda kerja yang kemudian terlepas akibat gaya gesek. Pada tahap akhir pengamatan, yakni menit ke-16,7 dengan $VB = 0,041$ mm, kedua mekanisme tersebut semakin terlihat: alur abrasif lebih rapat dan dalam, sementara indikasi adhesif tampak pada area tepi potong melalui pengelupasan material yang lebih jelas. Secara keseluruhan, mekanisme dominan yang terjadi adalah

keausan abrasif, dengan kontribusi adhesif wear pada durasi pemotongan yang lebih panjang [14]. Hal ini mengonfirmasi efektivitas NaCl sebagai media pendingin dalam memperlambat laju keausan dengan cara mengurangi akumulasi panas dan menjaga

stabilitas termal selama proses pengeboran, sehingga umur pahat lebih panjang dan kualitas permukaan hasil pemotongan dapat dipertahankan pada tingkat yang lebih baik.



Gambar 7. Jenis keausan pahat bor dengan kondisi pengeboran menggunakan NaCl

KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa penggunaan cairan pendingin memberikan kontribusi nyata terhadap performa proses pengeboran tulang kortikal, khususnya dalam kaitannya dengan tingkat keausan mata pahat. Dari perbandingan yang dilakukan, larutan NaCl menunjukkan efektivitas paling tinggi dalam memperlambat laju keausan, yakni sebesar 80,39%, dibandingkan dengan Opsite sebesar 82,76% serta pengeboran tanpa pendingin (kering) sebesar 86,49%. Fakta ini mengindikasikan bahwa NaCl mampu menekan intensitas gesekan yang terjadi pada zona kontak antara pahat dan material, sehingga memperpanjang umur pakai serta menjaga stabilitas performa alat potong.

Selain itu, kerusakan dominan yang muncul pada pahat adalah keausan tepi (*flank wear*), yang

disebabkan oleh interaksi berulang antara permukaan pahat dan tulang kortikal. Mekanisme ini mengakibatkan degradasi ketajaman sudut potong, meningkatnya temperatur akibat gesekan, serta penurunan efisiensi pemotongan. Pada kondisi tanpa pendingin, akumulasi panas yang lebih tinggi mempercepat keausan dan memperburuk performa pahat secara keseluruhan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemilihan cairan pendingin yang tepat, seperti NaCl, merupakan faktor penting untuk mengendalikan kenaikan temperatur sekaligus mengurangi gesekan selama proses pengeboran. Hasil penelitian ini tidak hanya memperkuat pentingnya pendinginan dalam operasi pemesinan biomedis, tetapi juga memberikan landasan dalam upaya meningkatkan umur pakai serta keandalan alat potong pada aplikasi serupa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Wang, X. Gao, B. Wang, M. Wang, Y. Liu, T. Zan, P. Gao, C. Liu, Evaluation of temperature distribution for bone drilling considering aging factor, *Med. Nov. Technol. Devices* 16 (2022) 100174. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100174>.
- [2] G.A. Ibrahim, Y. Burhanuddin, D. Embrijakto, Analisis Kepresisian Lobang Bor Pada Pemesinan Magnesium Az31 Menggunakan Metode Taguchi, Flywheel *J. Tek. Mesin Untirta* V (2019) 29. <https://doi.org/10.36055/fwl.v0i0.5116>.
- [3] M.R. Effatparvar, N. Jamshidi, A. Mosavar, Appraising efficiency of OpSite as coolant in drilling of bone, *J.*

- Orthop. Surg. Res. 15 (2020) 1–5. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01710-w>.
- [4] Y. Hu, Z. Yan, X. Li, C. Zhang, Q. Zheng, Prediction model of bone drilling temperature based on heat source method in surgical rehabilitation, *Procedia CIRP* 89 (2020) 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.150>.
- [5] M. Dias, J. Guedes, C. Flanagan, S. Hollister, P. Fernandes, Optimization of scaffold design for bone tissue engineering: A computational and experimental study, *Med. Eng. Phys.* 36 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.02.010>.
- [6] K. Alam, S.Z. Qamar, M. Iqbal, S. Piya, M. Al-Kindi, A. Qureshi, A. Al-Ghaithi, B. Al-Sumri, V. V. Silberschmidt, Effect of drill quality on biological damage in bone drilling, *Sci. Rep.* 13 (2023) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33381-y>.
- [7] J.G. Tsiagadigui, B. Ndiwe, M.A. Ngo Yamben, N. Fotio, F.E. Belinga, E. Njeugna, The effects of multiple drilling of a bone with the same drill bit: thermal and force analysis, *Heliyon* 8 (2022) e08927. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08927>.
- [8] A.G. Dityamri, G.A. Ibrahim, S. Harun, Y. Burhanuddin, Investigation Of Drilling Parameters Affecting Borehole Circularity In Cortical Bone, *J. Ilm. Tek. Mesin* 18 (2024) 71–79. <https://doi.org/10.24853/sintek.18.2.71-79>.
- [9] G.A. Ibrahim, Y. Burhanuddin, A. Firmansyah, A.G. Dityamri, D. Sartika, S. Harun, D. Adanta, Enhancing Precision and Reducing Surface Damage in Ti-6Al-4V ELI Cortical Screws through Optimized Polishing Techniques, *Eng. Lett.* 33 (2025) 886–897.
- [10] G.A. Ibrahim, Y. Burhanuddin, D. Emrijakto, A study on drill machining for Magnesium alloy using Taguchi method, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 857 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012014>.
- [11] G.A. Ibrahim, A. Hamni, D.A. Falah, Y. Burhanuddin, A. Arifin, D. Sartika, Dimensional Error Analysis of Cortical Screw during Threading of Magnesium AZ31, *J. Adv. Res. Appl. Mech.* 125 (2025) 14–26. <https://doi.org/10.37934/aram.125.1.1426>.
- [12] S.H. Gusri Akhyar Ibrahim, Mekanisme Aus Pahat Putar Pada Pemesinan Magnesium AZ31, *Rekayasa Mesin* (2020) 151–158.
- [13] J. Zuo, Y. Lin, 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)*. 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9040444>.
- [14] K. Zheng Yang, A. Pramanik, A.K. Basak, Y. Dong, C. Prakash, S. Shankar, S. Dixit, K. Kumar, N. Ivanovich Vatin, Application of coolants during tool-based machining – A review, *Ain Shams Eng. J.* 14 (2023) 101830. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101830>.