Terbit *online* pada laman web jurnal : http://inomet.ft.unand.ac.id

INoMeT: Jurnal Inovasi Rekayasa Mekanikal dan Termal

| ISSN (Online) 3025-2598 |

Artikel Penelitian

Pengaruh Jenis Pahat Terhadap Keausan Tepi Pahat pada Proses Membubut Metal Matrik Komposit Berpenguat Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit

Ismet Hari Mulyadi

"a Departemen Teknik Mesin Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis Padang 25163"

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 12 Desember 2025
Revisi Akhir: 19 Desember 2025
Diterbitkan *Online*: 26 Desember 2025

KATA KUNCI

Metal Matrix Composite

Keausan pahat

Umur pahat

KORESPONDENSI

E-mail: ismet@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

The machining of Metal Matrix Composites (MMCs) presents substantial challenges due to the non-homogeneous and anisotropic nature of their constituents, which typically leads to rapid tool wear and increased production costs. To address these issues, this study investigated the turning performance of an Al-Si matrix composite reinforced with oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fibers using High-Speed Steel (HSS), uncoated carbide, and TiN-coated carbide tools. Evaluated based on flank wear rate as well as tool life, the experimental results demonstrate that TiN-coated carbide offers the highest wear resistance compared to HSS and uncoated carbide. With an achieved tool life of approximately 25 minutes and a minimal wear rate of 0,0003 mm/min, TiN-coated carbide proves to be the most viable tooling option for optimizing the machining of Al-Si/OPEFB composites in terms of both tool longevity.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur modern saat ini menunjukkan tren peningkatan signifikan dalam penggunaan material komposit pada berbagai lini produk. Hal ini didorong oleh kemampuan material komposit untuk beradaptasi dengan kondisi operasional yang ekstrem melalui penggabungan unsur penyusun yang menghasilkan sifat mekanik spesifik, rasio kekuatan terhadap berat yang unggul, serta biaya produksi yang relatif kompetitif [1]. Implementasi material ini dapat ditemukan secara luas mulai dari komponen struktural seperti kerangka pesawat terbang dan sudu turbin uap, hingga aplikasi pada interior mobil dan sistem pengereman. Meskipun material komposit sering kali diproduksi mendekati bentuk akhir (*near-net shape*), proses pemesinan sekunder tetap menjadi keharusan untuk mencapai spesifikasi geometri, dimensi, dan toleransi akhir yang presisi. Dalam konteks komponen berbentuk silindris, proses membubut (*turning processes*) merupakan metode pemesinan yang paling umum digunakan untuk menghasilkan konfigurasi permukaan dan geometri akhir yang diinginkan [2].

Namun demikian, pemesinan pada material *Metal Matrix Composite* (MMC) menghadirkan tantangan teknis yang jauh lebih kompleks dibandingkan logam konvensional. Karakteristik anisotropi pada MMC, yang muncul akibat integrasi matriks logam dengan penguat serat alam, secara signifikan mempengaruhi sifat mampu mesin (*machinability*) mate-

https://doi.org/10.25077/inomet.3.2.20-26.2025

Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

rial tersebut [3]. Selama proses pembubutan, pahat akan berinteraksi secara bergantian dengan fasa matriks dan fasa penguat yang bersifat non-homogen. Interaksi ini memicu fluktuasi panas yang ekstrem pada mata potong dan menyebabkan laju keausan pahat menjadi sangat tinggi. Keausan pahat yang tidak terkendali memberikan dampak negatif berantai, mulai dari penurunan kualitas integritas permukaan produk hingga degradasi efisiensi waktu dan peningkatan biaya operasional [4]. Oleh karena itu, mitigasi keausan pahat menjadi prioritas utama dalam optimasi parameter pemesinan MMC.

Beberapa studi terdahulu telah berupaya memetakan perilaku keausan pahat pada pemesinan material MMC berbasis Al−Si. Li dan Seah (2001) mengkaji sifat mampu mesin komposit tersebut menggunakan pahat karbida tanpa pelapis dan menyimpulkan bahwa laju keausan abrasi pada sisi *flank* meningkat secara linear terhadap kecepatan potong [5]. Selanjutnya, Kilickap dkk. (2005) membandingkan performa pahat karbida lapis TiN dengan pahat tanpa pelapis, di mana hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan TiN mampu memberikan umur pahat yang lebih panjang dan kualitas permukaan yang lebih superior [6]. Meskipun demikian, masih terdapat kesenjangan informasi yang signifikan mengenai efisiensi komparatif antara pahat *High Speed Steel* (HSS), pahat karbida, dan pahat karbida lapis TiN secara spesifik pada material MMC dengan penguat serat alam, khususnya Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS).

Keterbatasan data empiris mengenai interaksi antara variasi jenis pahat dengan karakteristik serat TKKS pada matriks alumunium paduan menjadi dasar urgensi dilakukannya penelitian ini. Dengan memahami karakteristik keausan secara mendalam, risiko kerusakan produk dapat diminimalisir serta kualitas dan efisiensi produksi dapat ditingkatkan secara signifikan. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi dan menganalisis tingkat keausan serta efisiensi penggunaan tiga variasi pahat (*HSS*, Karbida, dan Karbida lapis TiN) pada proses pembubutan material Metal Matrix Composite dengan matriks aluminium paduan (Al−Si) yang diperkuat oleh serat tandan kosong kelapa sawit.

2. METODOLOGI

2.1. Bahan dan Peralatan

Spesimen komposit matriks aluminium paduan Al-SiC yang diperkuat dengan serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dibuat dengan dimensi diameter 44 mm dan panjang 250 mm. Pembubutan silindris dilakukan menggunakan mesin bubut Krisbow tipe KW 15-907, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Proses ini bertujuan untuk mengevaluasi performa mata pahat terhadap material komposit hibrida tersebut



Gambar 1. Metal Matrix Composite (MMC) Al-SiC dan Serat tandan kosong kelapa sawit

Selanjutnya, pembubutan silindris dilaksanakan dengan tiga jenis mata pahat yang berbeda, yaitu: (a) mata pahat *high-speed steel* (HSS) *tungsten* seri-T, (b) mata pahat karbida *tungsten cemented carbide* (WC-Co), dan (c) mata pahat karbida berlapis *titanium nitride* (TiN), sebagaimana digambarkan pada Gambar 2. Pemilihan variasi mata pahat ini memungkinkan perbandingan komprehensif mengenai laju keausan.



(a) (b) (c)

Gambar 2. Jenis pahat yang dipergunakan

Sedangkan, keausan tepi mata potong pahat diukur menggunakan mikroskop *stereo Olympus* SZX-10 dengan rentang pembesaran digital 0,63× hingga 6,3× yang telah dilengkapi perangkat lunak pengukuran terintegrasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pengukuran dilakukan secara periodik untuk memantau perkembangan keausan tepi pahat (*Flank Wear*) secara kuantitatif.

 https://doi.org/10.25077/inomet.3.2.20-26.2025



Gambar 3. Stereo Microscope merk Olympus SZX-10

2.2. Metode

Eksperimen pembubutan dalam penelitian ini dilakukan di bawah kondisi pemesinan kering (*dry machining*) untuk mengevaluasi respons material secara langsung tanpa dipengaruhi oleh pendinginan atau pelumasan dari cairan pendingin. Untuk memastikan perbandingan yang terkontrol, parameter pemotongan dijaga pada kondisi konstan, yaitu: kecepatan potong (V_c) sebesar 80 m/menit, gerak makan (f) sebesar 0,2 mm/putaran, dan kedalaman potong aksial (a_p) sebesar 1,5 mm. Setiap tahapan pemesinan dilakukan pada panjang pemotongan tetap (lt) sebesar 100 mm.

Proses pemotongan dilaksanakan secara bertahap. Setelah setiap tahapan panjang pemotongan yang ditentukan selesai, pahat diinspeksi hingga mencapai kriteria batas keausan tepi (*flank wear criterion*, VB) sebesar 0,12 mm. Untuk menjamin validitas hasil Analisa statistik dari hasil yang diperoleh dilakukan. Setiap pengujian dilakukan dengan tiga kali pengulangan (*repetition*) untuk setiap jenis pahat. Data yang terkumpul kemudian digunakan untuk menganalisis perkembangan keausan tepi pahat (*progression of flank wear*) serta mengevaluasi laju keausan dan umur pahat yang disebabkan oleh perbedaan material pahat yang digunakan.

Selanjutnya, umur pahat (T) ditentukan dengan menghitung akumulasi waktu pemotongan efektif (tc) yang diperlukan pahat untuk mencapai batas kriteria keausan yang telah ditetapkan. Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan hubungan fungsional berdasarkan Persamaan 1.

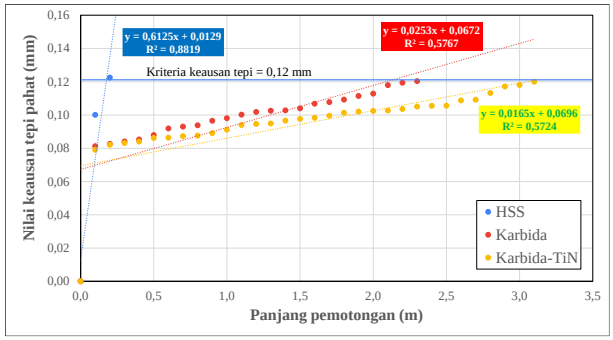
$$T = \frac{l_t}{fx\frac{1000V_c}{\pi x \bar{d}}} \qquad \ldots 1$$

Yang mana $\bar{d}$ merupakan diameter rata-rata benda kerja yang mengalami pembubutan dalam mm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Jenis Pahat Terhadap Laju Keausan Tepi Pahat

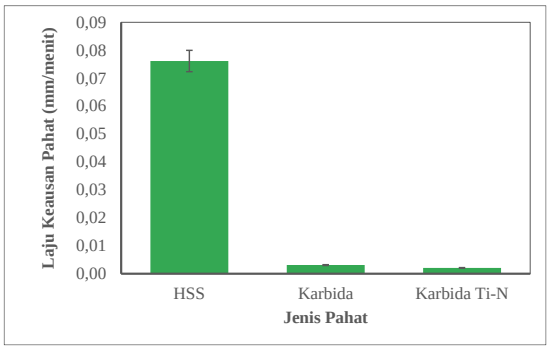
Pergerakan keausan tepi (*flank wear*) yang diamati pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4. Selanjutnya hasil pada Gambar 4 diolah untuk menentukan laju keausan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5. Hasil yang diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 mengonfirmasi bahwa karakteristik termomekanis (interaksi antara panas dan perubahan bentuk atau gaya) material pahat merupakan variabel kritis dalam pemesinan MMC Al-Si/TKKS. Perbedaan performa yang kontras di antara ketiga jenis pahat mencerminkan respons material yang berbeda terhadap interaksi abrasif dari partikel Si dalam matriks aluminium serta sifat anisotropik dari penguat serat alam TKKS.



Gambar 4 Perkembangan keausan tepi pahat pada proses membubut material komposit Al-Si dengan penguat tandan kosong kelapa sawit

Pahat HSS menunjukkan ketahanan aus yang paling rendah dengan mengalami kegagalan katastropik (*catastrophic failure*) pada jarak tempuh pemotongan yang sangat singkat (lt = 200 mm). Fenomena ini merupakan indikasi langsung dari ketidakmampuan HSS dalam mempertahankan kekerasan panas (*red/ hot hardness*) saat menghadapi akumulasi panas ekstrem di zona geser. Pelunakan mata potong yang terjadi secara cepat memicu laju pengikisan mekanis yang tidak terkendali pada sisi *flank*. Sebagaimana dijelaskan oleh Davim (2014), rendahnya stabilitas termal pada pahat dengan kekerasan rendah akan mempercepat degradasi akibat

penetrasi partikel penguat yang abrasif [7]. Sebaliknya, pahat karbida lapis TiN menunjukkan stabilitas yang luar biasa hingga melampaui lt = 3100 mm. Performa ini membuktikan efektivitas lapisan TiN sebagai penghalang termal (*thermal barrier*) sekaligus reduktor gesekan. Secara fisik, lapisan TiN menurunkan koefisien gesek pada antarmuka pahat-geram, yang sangat krusial untuk memitigasi panas fluktuatif akibat karakteristik serat alam yang non-homogen [6]. Selain itu, kekerasan permukaan TiN yang tinggi memberikan ketahanan terhadap impak mikro dari fasa penguat, sehingga mencegah degradasi dini pada integritas mata potong. Selanjutnya hal tersebut akan mampu menggeser mekanisme keausan dari abrasif agresif menjadi keausan terkendali (*controlled wear*)[8,9].



Gambar 5 Pengaruh jenis pahat terhadap laju keausan tepi

Untuk memperkuat temuan visual tersebut, analisis varians (ANOVA) satu arah (Tabel 1) mengkonfirmasi bahwa jenis material pahat berpengaruh sangat signifikan terhadap laju keausan pada tingkat kepercayaan 95% ($\rho < 0,05$). Nilai F_{hitung} yang jauh melampaui F_{tabel} membuktikan bahwa perbedaan performa yang diamati merupakan hasil dari karakteristik intrinsik material, bukan variasi acak eksperimental.

Tabel 1. Hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) one-way untuk pengaruh variasi pahat terhadap laju keausan tepi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	ρ-Value
Jenis Pahat	2	0,0108	99,98%	0,0108	0,0054	12517,64	0,000
Error	6	0,0000	0,02%	0,0000	0,0000		
Total	8	0,0108	100,00%				

Tabel 2. Pengelompokkan respon laju keausan pahat menggunakan metoda Tukey dengan tingkat keyakinan 95%

Jenis Pahat	N	Mean	Grouping
HSS	3	0,076133	A
Karbida	3	0,003100	B
Karbida Ti-N	3	0,002067	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tabel 3. Hasil *test post hoc* dengan Tukey *Simulatenous Test* untuk *Difference Means* pada laju keausan pahat

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted ρ-Value
Karbida - HSS	-0,073033	0,000537	(-0,074681; -0,071386)	-136,05	0,000
Karbida Ti-N - HSS	-0,074067	0,000537	(-0,075714; -0,072419)	-137,98	0,000
Karbida Ti-N - Karbida	-0,001033	0,000537	(-0,002681; 0,000614)	-1,93	0,212

Individual confidence level = 97,80%

Sedangkan, berdasarkan uji lanjut *Post Hoc Tukey* HSD (Tabel 2 dan Tabel 3), transisi dari HSS ke pahat berbasis karbida memberikan reduksi laju keausan yang paling drastis. Menariknya, meskipun perbandingan antara Karbida dan Karbida Lapis TiN secara statistik menunjukkan nilai $\rho = 0,212$ (berada di atas ambang signifikansi 0,05), secara fisik keberadaan lapisan TiN memberikan modifi-

 https://doi.org/10.25077/inomet.3.2.20-26.2025

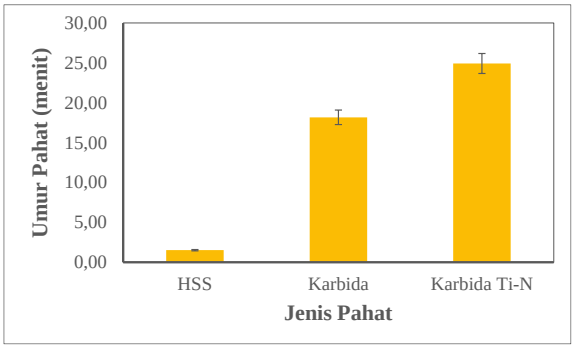
kasi permukaan yang secara nyata meningkatkan konsistensi ketahanan aus. Hal ini dibuktikan dengan laju keausan yang sangat rendah dan stabil sebesar 0,0003 mm/menit dengan deviasi standar yang minim.

Oleh karena itu, penambahan lapisan TiN membuktikan kemampuan sebagai penahan panas (*thermal barrier*) yang efektif. Pelapisan tidak hanya menjadi sekedar modifikasi marginal, melainkan prasyarat teknis untuk mencapai efisiensi dalam pemesinan MMC.

Selain itu, penggunaan pahat karbida lapis Ti-N tidak hanya menjamin stabilitas dimensi benda kerja dalam waktu yang lebih lama, tetapi juga secara langsung menekan biaya produksi melalui pengurangan frekuensi penggantian pahat (*tool changeover time*). Temuan ini memperkuat urgensi pemilihan material pahat dengan modifikasi permukaan untuk mengoptimalkan proses manufaktur material komposit berbasis serat alam [10,11].

3.2. Pengaruh Jenis Pahat Terhadap Umur Pahat

Pada Gambar 6 diperlihatkan perbedaan umur pahat sebagai akibat perbedaan jenis pahat yang dipilih. Dari Gambar 6 terlihat bahwa disparitas umur pahat yang signifikan terjadi, di mana pahat HSS mengalami kegagalan prematur akibat rendahnya *hot hardness* saat menghadapi beban termal fluktuatif dan sifat abrasif fasa penguat Al-Si/TKKS. Fenomena ini mengkonfirmasi teori Davim (2014) bahwa material dengan stabilitas termal rendah tidak mampu mempertahankan integritas mata potong dalam pemesinan MMC, yang berujung pada degradasi katastropik dalam waktu singkat [7].



Gambar 6. Pengaruh jenis pahat terhadap umur pahat

Sebaliknya, pencapaian umur pahat maksimal pada karbida lapis TiN (∞ 25 menit) membuktikan efektivitas lapisan film tipis sebagai *thermal barrier* yang mengisolasi substrat dari difusi panas ekstrem. Lapisan TiN meningkatkan ketahanan abrasi mikro terhadap serat TKKS yang anisotropik, sehingga menggeser laju keausan ke fase *steady-state* yang lebih panjang [6]. Stabilitas umur pahat yang ditunjukkan oleh karbida berlapis ini merupakan parameter krusial untuk menjamin konsistensi dimensi benda kerja serta efisiensi biaya operasional dalam manufaktur komposit [10].

Analisis kuantitatif melalui *One-Way* ANOVA (Tabel 4) mengonfirmasi secara kuat bahwa variasi jenis material pahat memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap umur pahat ($\rho \leq 0{,}05$). Kontribusi variabel jenis pahat mencapai 97,80% terhadap total varians data, dengan nilai F_{hitung} sebesar 2835,43 yang jauh melampaui ambang batas kritikal. Hal ini menegaskan bahwa perbedaan umur pahat yang teramati bukan merupakan fluktuasi eksperimental, melainkan hasil dari perbedaan karakteristik termomekanis yang melekat pada masing-masing material pahat saat berinteraksi dengan material MMC Al-Si/TKKS.

Tabel 4. Hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) one-way untuk pengaruh variasi pahat terhadap umur pahat

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	ρ-Value
Jenis Pahat	2	871,020	99,89%	871,020	435,510	2835,43	0,000
Error	6	0,922	0,11%	0,922	0,154		
Total	8	871,941	100,00%				

Tabel 5. Pengelompokkan respon umur pahat menggunakan metoda Tukey dengan tingkat keyakinan 95%

Jenis Pahat	N	Mean	Grouping
Karbida Ti-N	3	24,930	A
Karbida	3	18,169	B
HSS	3	1,5188	C

Means that do not share a letter are significantly different

Tabel 6. Hasil *test post hoc* dengan Tukey *Simulatenous Test* untuk *Difference Means* pada umur pahat

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted ρ-Value
Karbida - HSS	16,650	0,320	(15,668; 17,632)	52,03	0,000
Karbida Ti-N - HSS	23,411	0,320	(22,429; 24,393)	73,16	0,000
Karbida Ti-N - Karbida	6,761	0,320	(5,779; 7,743)	21,13	0,000

Individual confidence level = 97,80%

Untuk mengidentifikasi perbedaan spesifik antar material, dilakukan uji Tukey's *Honestly Significant Difference* (HSD) dengan tingkat kepercayaan 95%. Hasil pengujian (Tabel 5) menunjukkan bahwa ketiga jenis pahat berada pada grup yang berbeda (A, B, dan C) dan perbedaan antara jenis pahat terhadap umur pahat kecil dari 0,05 (Tabel 6), yang mengonfirmasi bahwa setiap transisi material pahat memberikan perubahan umur pahat yang signifikan secara statistik.

Signifikansi statistik ini secara ilmiah memperkuat argumen bahwa modifikasi permukaan melalui pelapisan Ti-N berhasil menciptakan mekanisme perlindungan yang superior terhadap abrasi mikro dari serat TKKS dan panas fluktuatif di zona pemotongan. Berbeda dengan analisis laju keausan sebelumnya di mana perbedaan antara Karbida dan Karbida Ti-N tidak mencapai signifikansi tajam ($\rho = 0{,}212$), pada parameter umur pahat, perbedaan tersebut menjadi sangat nyata ($\rho = 0{,}000$). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun laju keausannya tampak serupa secara instan, akumulasi ketahanan aus yang diberikan oleh lapisan Ti-N secara kumulatif memberikan masa pakai yang jauh lebih lama dan konsisten, yang sangat esensial untuk optimalisasi biaya produksi massal komponen komposit.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menegaskan bahwa stabilitas termomekanis adalah faktor determinan dalam pemesinan komposit Al-Si/TKKS; di mana penggunaan lapisan TiN pada pahat karbida terbukti secara statistik krusial sebagai *thermal barrier* yang memitigasi keausan agresif dan mencegah kegagalan katastropik prematur yang dialami oleh pahat HSS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan ke Lukman Alrasyid Angkatan 2012 mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas yang telah membantu dalam pengambilan data dari artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar Pustaka ditulis mengikuti format berikut:

[1.] T. Rochim, "Proses Pemesinan ; Teori dan Teknologi" , Laboratorium Teknik Produksi, Jurusan Teknik Mesin, FTI, ITB, 1993.

[2.] A. Sutanto, "Bahan Ajar Proses Produksi I", Universitas Andalas, Padang, 2009.

[3.] S. Kalpakjian, "Manufacturing Engineering and Technology", 3rd edition, New York, Addyson - Wesley Publishing Company, 1995.

[4.] E. P. De garmo, J. T Black, "Material and Processes in Manufacturing", New York, Macmillan Publishing Company, 1988.

[5.] Li. Xiaoping, Seah. W.K.H, "Tool Wear Acceleration in Relation to Workpiece Reinforcement Percentage in Cutting of Metal Matrix Composites", Singapore, Department

of Mechanical and Production Engineering, The National University of Singapore, 2000.

[6.] E. Kılıçkap, O. Çakır, M. Aksoy, A. İnan, "Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164–165, pp. 862-867, 2005, ISSN 0924-0136, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.109

[7.] J.P. Davim, "Machining of Metal Matrix Composites". Springer Science & Business Media, 2014.

[8.] C. Cozzo, G. E. D'Errico, & S. Bugliosi, "Tool wear and surface integrity in machining of metal matrix composites". International Journal of Material Forming, vol. 5(1), pp. 1-15. 2012. https://doi.org/10.1007/s12289-011-1025-x

[9.] S. Kannan, & H.A. Kishawy, "Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites". Journal of Materials Processing Technology, vol. 198(1-3), pp. 399-406. 2008. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.032

[10.] S. C. Lin, & C. J. Weng, "An economic analysis of the machining of metal matrix composites". Journal of Materials Processing Technology. Vol. 45 (1-4), pp. 603-608, 2010.

[11.]. Pramanik, L.C. Zhang & J.A. Arsecularatne, "An overview of machining of aluminum based metal matrix composites". International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47(5), pp. 713-733, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.010