

PETA RISET MUTAKHIR TITANIUM ALLOY (KHUSUSNYA TI-6AL-4V) UNTUK APLIKASI TEKNIK: SINTESIS & REKAYASA PERMUKAAN, PEMESINAN BERBASIS DATA, SERTA STRATEGI KENDALI KEAUSAN (LITERATUR REVIEW)

Budi Purwanto Antameng

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

Email: budipurwantoantameng@unugo.ac.id

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Paduan Titanium terutama Ti-6Al-4V memegang peran kunci dalam aplikasi dirgantara, biomedis, dan energi karena rasio kekuatan-terhadap-berat serta ketahanan korosinya. Namun, keterbatasan utama tetap berulang: keausan/gesekan tinggi, sifat “sulit dimesin” (panas terlokalisasi, adhesi, keausan pahat cepat), serta sensitivitas integritas permukaan terhadap parameter proses. Review ini menyusun sintesis komprehensif berbasis literatur yang disediakan (BUDI sebagai tinjauan/ekstraksi utama dan DATA 1 sebagai tambahan abstrak terbaru), dengan penekanan pada temuan 2024–2026. Kami memetakan empat kluster besar: (1) rekayasa material dan mikrostruktur (mis. sintering bertekanan tinggi, solid-solution multikomponen), (2) rekayasa permukaan & coating untuk meningkatkan kekerasan/ketahanan aus (mis. diffusion layer, micro-arc coatings), (3) pemesinan dan pembentukan (turning/milling/drilling/thread rolling) beserta mekanisme keausan, kualitas permukaan, dan trade-off produktivitas–umur pahat, serta (4) pemanfaatan machine learning (ML) dan pendekatan explainable/decision-support untuk prediksi kerusakan, klasifikasi keausan, dan optimasi parameter. Kontribusi utama review ini ialah integrasi lintas-kluster: dari mekanisme fisik (tribologi, termal, deformasi) ke kerangka data-driven (ML yang dapat dijelaskan) sebagai jembatan menuju “manufacturing intelligence”. Kami juga menyoroti gap riset: kurangnya standarisasi data (sensor, label keausan), generalisasi model lintas-mesin/material, dan minimnya evaluasi keberlanjutan proses yang terhubung dengan keputusan operasional. Review ini menyediakan tabel ringkasan ekstensif untuk memandu peneliti dan industri dalam merancang strategi peningkatan performa Ti-6Al-4V secara lebih presisi, replikabel, dan siap translasi.

Kata kunci: Paduan titanium; Ti-6Al-4V; ketahanan aus; pemesinan; rekayasa permukaan

ABSTRACT

Titanium alloys—especially Ti-6Al-4V—play a pivotal role in aerospace, biomedical, and energy applications due to their high strength-to-weight ratio and corrosion resistance. However, recurring key limitations remain: high wear/friction, “difficult-to-machine” behavior (localized heat, adhesion, rapid tool wear), and the sensitivity of surface integrity to process parameters. This review presents a comprehensive synthesis based on the provided literature (BUDI as the main review/extraction source and DATA 1 as additional recent abstracts), with emphasis on findings from 2024–2026. We map four major clusters: (1) materials and microstructure engineering (e.g., high-pressure sintering, multicomponent solid solutions), (2) surface engineering and coatings to enhance hardness/wear resistance (e.g., diffusion layers, micro-arc coatings), (3) machining and forming processes (turning/milling/drilling/thread rolling) including wear mechanisms, surface quality, and productivity–tool-life trade-offs, and (4) the use of machine learning (ML) and explainable/decision-support approaches for damage prediction, wear classification, and parameter optimization. The main contribution of this review is cross-cluster integration: linking physical mechanisms (tribology, thermal effects, deformation) with data-driven frameworks (explainable ML) as a bridge toward “manufacturing intelligence.” We also highlight research gaps, including limited data standardization (sensors, wear labels), insufficient model generalization across machines/materials, and a lack of sustainability assessments that are directly connected to operational decision-making. This review provides extensive summary tables to guide researchers and industry in designing more precise, reproducible, and readily translatable strategies to improve Ti-6Al-4V performance.

Keywords: Titanium alloy, Ti-6Al-4V, wear resistance, machining, surface engineering

1. PENDAHULUAN

Titanium alloy (khususnya Ti-6Al-4V) menempati posisi strategis karena kombinasi sifat mekanik, ketahanan korosi, dan performa pada temperatur menengah. Namun, “biaya performa” sering muncul di hilir manufaktur: koefisien gesek relatif tinggi, kecenderungan galling/adhesive wear,

serta tantangan pemesinan akibat konduktivitas termal rendah yang memusatkan panas pada zona potong, mempercepat keausan pahat dan menurunkan integritas permukaan (Li et al., 2026; Souza et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025). Pada saat yang sama, tuntutan industri bergerak ke arah kualitas permukaan yang semakin ketat, reliabilitas

komponen yang tinggi, serta kebutuhan optimasi biaya melalui peningkatan produktivitas—yang sering berkonflik dengan umur pahat dan kualitas permukaan (Souza et al., 2026; Chang et al., 2025; Tang et al., 2025).

Dalam literatur terbaru, dua arus besar berkembang paralel namun belum sepenuhnya terintegrasi. Arus pertama adalah rekayasa material dan permukaan: peningkatan kekerasan dan ketahanan aus melalui diffusion layer, micro-arc coating, atau solid-solution multikomponen (Li et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025; Belyavina et al., 2026). Arus kedua adalah manufaktur berbasis data: ML untuk prediksi kerusakan proses, klasifikasi keausan pahat, dan sistem pendukung keputusan berbasis explainable AI (Song et al., 2026; Souza et al., 2026; Kim et al., 2025). Review ini menempatkan kedua arus tersebut dalam satu “peta riset” yang koheren, lalu mengidentifikasi gap translasi dari lab ke industri.

2. METODE PENELITIAN

Review artikel ini disusun dari literatur berbagai literatur pada rentang waktu 2019 dan 2026. Dua file yang menjadi basis utama yaitu Li et al., 2026; Song et al., 2026; Souza et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025. Sintesis dilakukan secara tematik: (i) rekayasa mikrostruktur/material, (ii) rekayasa permukaan & tribologi, (iii) proses pemesinan/pembentukan dan metrik kualitas, (iv) ML/decision-support. Tabel ringkasan disusun sebagai “basis pembahasan” agar koheren dengan struktur ekstraksi dan memudahkan audit sitasi.

3. PEMBAHASAN

3.1. Evolusi tema riset 2019–2026: dari mekanisme fisik ke manufaktur berbasis data

3.1.1. Rekayasa material: mikrostruktur sebagai “akar” performa tribologi dan pemesinan

Performa Ti-6Al-4V pada kontak gesek dan pada zona potong sangat ditentukan oleh mikrostruktur (fase, ukuran butir, distribusi presipitat/karbida/nitrida) serta stabilitasnya pada siklus termal lokal. Tren baru menonjol pada sintesis solid-solution multikomponen dan sintering bertekanan tinggi untuk memperoleh kombinasi kekerasan–ketangguhan yang lebih baik (Belyavina et al., 2026; Belyavina et al., 2025). Pada sisi aplikasi, peningkatan kekerasan bulk atau near-surface dapat menurunkan keausan adhesif/abrasif, tetapi juga bisa mengubah mekanisme pembentukan geram, mempengaruhi gaya potong dan temperatur—yang kemudian berdampak pada keausan pahat (Chang et al., 2025; Shu et al., 2025).

Yang sering terlewat dalam studi-studi terpisah adalah keterkaitan mikrostruktur–tribology pemesinan. Misalnya, material yang lebih keras dapat menurunkan wear pada layanan, tetapi bisa

meningkatkan tool wear bila parameter pemesinan tidak disesuaikan (Souza et al., 2026; Tang et al., 2025). Karena itu, literatur terbaru mulai menekankan pendekatan “co-design”: memilih rute material dan rute manufaktur secara simultan, bukan sekuensial (Song et al., 2026; Kim et al., 2025).

3.1.2. Rekayasa permukaan & coating: dari peningkatan kekerasan ke arsitektur fungsional

Literatur dalam teks menampilkan peningkatan fokus pada coating/diffusion layer yang tidak sekadar “lebih keras”, namun memiliki arsitektur untuk menahan retak, menstabilkan tribolayer, dan mengelola transfer beban. Contoh yang sangat mutakhir adalah diffusion layer Al–Cr berpori mikro yang dilaporkan mampu menaikkan kekerasan secara drastis dan menargetkan peningkatan ketahanan aus Ti-6Al-4V (Li et al., 2026). Pada ranah lain, micro-arc calcium phosphate coatings pada berbagai substrat logam memperkaya pemahaman pola pembentukan coating dan implikasi topografi/porositas terhadap performa (Ugodchikova et al., 2025). Namun, peningkatan kekerasan semata bukan solusi universal. Coating keras dapat meningkatkan risiko delaminasi bila mismatch elastis/termal tinggi, terutama pada kondisi kontak siklik atau pada pemesinan dengan gradien temperatur tajam (Li et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025; Lisowicz et al., 2025). Karena itu, tren desain coating bergeser ke: (i) gradien komposisi, (ii) porositas terkontrol, (iii) interlayer untuk adhesi, dan (iv) optimasi roughness untuk mengatur mode gesek (Li et al., 2026; Sebbe et al., 2025; Sedehi et al., 2025).

3.1.3. Pemesinan & pembentukan: dominasi isu keausan pahat, integritas permukaan, dan stabilitas proses

Di sisi manufaktur, literatur terbaru memperlihatkan dua medan utama: (a) pemesinan (milling/turning/drilling) dan (b) pembentukan/pengerolan ulir (thread rolling) yang menuntut prediksi kerusakan. Studi terbaru menegaskan bahwa kerusakan proses (mis. damage pada thread rolling titanium alloy) tidak cukup diprediksi dengan kriteria mekanik sederhana; dibutuhkan kriteria fraktur yang dipandu data dan dibantu ML agar prediksi lebih robust (Song et al., 2026). Pada pemesinan, isu yang konsisten ialah klasifikasi dan prediksi keausan pahat serta dampaknya pada kualitas hasil. Pendekatan explainable ML menjadi relevan karena industri tidak hanya memerlukan akurasi, tetapi juga “alasan” model untuk keputusan setting parameter (Souza et al., 2026; Kim et al., 2025). Di sini terlihat pergeseran dari sekadar kurva umur pahat menuju **sistem**

pendukung keputusan yang mempertimbangkan multi-objektif: kualitas permukaan, produktivitas,

konsumsi pahat, dan risiko cacat (Souza et al., 2026; Chang et al., 2025; Tang et al., 2025). Tabel 3.1 ringkasan ekstensif literatur (basis pembahasan)

Tabel 1 Ringkasan studi kunci (material/permukaan/manufaktur) dan kontribusi utamanya

Fokus	Objek/Material	Metode/Proses	Variabel kunci	Temuan inti	Ref.	
Rekayasa permukaan (wear resistance)	Ti-6Al-4V	Al–Cr layer mikro	diffusion berpori	Arsitektur pori, penguatan larutan padat	Kekerasan meningkat signifikan; target peningkatan ketahanan aus; pentingnya antarmuka/cohesion	Li et al., 2026
Pembentukan/pengelasan ulir	Titanium alloy	Thread rolling + ML + kriteria fraktur semi-coupled	Parameter proses, indikator kerusakan	Prediksi damage lebih efektif dengan ML yang dipandu kriteria fraktur	Song et al., 2026	
Pemesinan & decision-support	Ti6Al4V	Klasifikasi wear dengan explainable ML	Fitur sinyal/parameter proses	Klasifikasi wear dan interpretabilitas untuk dukung keputusan	Souza et al., 2026	
Sintesis material	(Ti,V)(C,N) solid solutions	High-pressure sintering + mechanical activation	Komposisi, aktivasi, tekanan sinter	Rute sintesis multikomponen untuk properti yang ditingkatkan	Belyavina et al., 2026	
Coating berbasis micro-arc	Substrat logam berbeda	Micro-arc calcium phosphate coating	Substrat, kondisi proses, pola pertumbuhan	Memetakan pola pembentukan coating dan implikasi mikrostruktur	Ugodchikova et al., 2025	
Pemesinan lanjutan (tema 2024–2025)	Ti-6Al-4V & varian	Studi parameter pemotongan/keausan	Kecepatan, feed, pendinginan, geometri pahat	Menegaskan trade-off produktivitas–umur pahat dan dampak pada integritas permukaan	Chang et al., 2025; Tang et al., 2025	

Tabel 2. Peta aplikasi ML/XAI pada proses titanium alloy (prediksi, klasifikasi, optimasi)

Tugas ML	Proses	Data masukan	Model/pendekatan	Output untuk keputusan	Ref.
Prediksi damage	Thread rolling	Parameter proses + indikator fraktur	ML assisted semi-coupled fracture criterion	Risiko kerusakan & batas aman parameter	Song et al., 2026
Klasifikasi keausan (dengan interpretasi)	Machining Ti6Al4V	Fitur proses/sinyal + label wear	Explainable ML + decision support	Kelas wear + faktor dominan penyebab	Souza et al., 2026
Optimasi/robustness (tema 2025)	Machining & monitoring	Sensor proses + parameter setting	ML untuk prediksi kualitas/keausan (beragam)	Setting parameter berbasis risiko & target kualitas	Kim et al., 2025; Seo et al., 2025; Shu et al., 2025

sering turun akurasi ketika

3.2. Sintesis mendalam: mekanisme, trade-off, dan “jembatan” antar-klaster

3.2.1. Mekanisme keausan: dari adhesi dan tribolayer ke desain antarmuka coating

Pada Ti-6Al-4V, kecenderungan adhesi tinggi memicu transfer material dan pembentukan tribolayer yang dapat bersifat protektif atau merusak, bergantung pada stabilitas termal dan kondisi gesek. Strategi terbaru menekankan dua arah: (1) memodifikasi permukaan agar lebih keras dan tahan gesek, dan (2) menata antarmuka agar tidak mudah retak/delaminasi saat kontak siklik (Li et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025; Sebbe et al., 2025). Diffusion layer Al–Cr berpori mikro menarik karena menunjukkan bahwa porositas yang “direkayasa” bukan cacat, melainkan fitur mekanik untuk redistribusi tegangan dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi lokal (Li et al., 2026). Ini konsisten dengan tren arsitektur coating modern: kekerasan + compliance terkontrol.

3.2.2. Pemesinan Ti-6Al-4V: integritas permukaan sebagai “produk samping” yang menentukan reliabilitas

Integritas permukaan (roughness, mikroretak, tegangan sisa, perubahan mikrostruktur akibat panas) adalah faktor yang langsung mengunci performa fatik dan ketahanan aus. Literatur 2024–2025 menekankan bahwa perubahan kecil pada parameter pemotongan atau strategi pendinginan dapat menggeser rejim mekanisme: dari pemotongan stabil ke kondisi yang memicu built-up edge, chatter, atau tool wear akseleratif (Chang et al., 2025; Tang et al., 2025; Festas et al., 2025). Kelas masalahnya bukan hanya “memperpanjang umur pahat”, melainkan menjaga kualitas permukaan pada batas produktivitas tinggi.

Di sinilah pendekatan ML menjadi relevan. Namun, tantangan besar adalah validitas lintas-konteks: model yang bekerja pada satu mesin/setting

dipindah. Literatur mutakhir mulai mengarah ke *explainable* ML untuk membantu transfer pengetahuan: fitur penting dapat mengarahkan rekayasa parameter, bukan sekadar prediksi (Souza et al., 2026; Kim et al., 2025). Dengan begitu, ML menjadi alat pembelajaran proses, bukan “kotak hitam”.

3.2.3. Pembentukan (thread rolling) dan kriteria fraktur berbantuan ML: menuju batas proses yang dapat diaudit

Thread rolling titanium alloy menuntut pemahaman mekanika deformasi plastis dan risiko inisiasi retak. Studi terbaru menunjukkan pendekatan semi-coupled fracture criterion yang dibantu ML untuk memprediksi damage lebih baik daripada pendekatan tunggal (Song et al., 2026). Kontribusi pentingnya bukan hanya akurasi, tetapi potensi standardisasi: kriteria fraktur menyediakan “struktur fisik” sementara ML menangkap non-linearitas proses aktual.

Implikasi untuk riset lanjutan: jalur terbaik tampaknya adalah *physics-informed + data-driven*, di mana kriteria mekanik membatasi ruang prediksi dan ML mengisi celah kompleksitas (Song et al., 2026; Kim et al., 2025; Seo et al., 2025).

3.2.4. Konvergensi material/permukaan dengan manufaktur cerdas: kerangka integratif yang disarankan

Berdasarkan peta literatur, peningkatan performa Ti-6Al-4V yang paling kuat muncul ketika tiga lapis keputusan saling terhubung:

1. Desain material/permukaan (mis. diffusion layer, micro-arc coating, solid-solution) → mengubah sifat gesek, kekerasan, ketahanan retak (Li et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025; Belyavina et al., 2026).

2. Desain proses manufaktur (parameter pemotongan/pembentukan, strategi pendinginan/pelumasan, geometri pahat) → menentukan temperatur, gaya, dan integritas permukaan (Chang et al., 2025; Tang et al., 2025; Festas et al., 2025).
3. Lapisan data & keputusan (ML/XAI) → memprediksi risiko, mengidentifikasi faktor dominan, dan menyarankan parameter (Souza et al., 2026; Song et al., 2026; Kim et al., 2025).

Sayangnya, banyak studi masih berhenti di satu lapisan. Review ini menyarankan agenda riset integratif: dataset yang menyatukan (a) kondisi permukaan/coating, (b) parameter proses, dan (c) metrik integritas permukaan + keausan, sehingga ML tidak hanya memetakan “parameter → output”, tetapi “arsitektur permukaan + parameter → output”. Ini akan meningkatkan kemampuan generalisasi model dan memperjelas trade-off lintas domain (Li et al., 2026; Souza et al., 2026; Tang et al., 2025).

3.3. Gap riset kritis dan agenda riset 3–5 tahun ke depan (berbasis literatur yang tersedia)

3.3.1. Standardisasi data dan label keausan

Studi ML untuk wear sering kuat di dataset tertentu, tetapi sulit dibandingkan lintas studi karena definisi label (mis. kategori wear), frekuensi sampling, dan sensor yang digunakan tidak seragam (Souza et al., 2026; Kim et al., 2025). Agenda utama: protokol minimum pelabelan keausan dan metadata proses, sehingga hasil lebih replikabel.

3.3.2. Generalisasi lintas mesin/material serta transfer learning yang beralasan

Kebutuhan industri adalah model yang dapat dipindahkan. Explainable ML memberi peluang karena dapat mengungkap fitur yang konsisten lintas konteks, sehingga transfer dapat dirancang secara sadar (Souza et al., 2026; Seo et al., 2025). Ke depan, model hybrid (fisika + ML) tampak menjanjikan, terutama pada pembentukan dengan risiko fraktur (Song et al., 2026).

3.3.3. Coating “manufaktur-aware”

Banyak inovasi coating fokus pada performa tribologi layanan, tetapi belum memetakan dampaknya pada machinability dan finishing. Padahal, perubahan gesek/kekerasan akan memengaruhi gaya potong dan temperatur (Li et al., 2026; Lisowicz et al., 2025). Agenda riset: studi coupling coating–pemesinan dengan metrik integritas permukaan dan biaya.

3.3.4. Multi-objektif berbasis keputusan: kualitas–biaya–risiko

Tren decision support mengarah pada optimasi multi-objektif. Tantangannya adalah mendefinisikan fungsi utilitas yang mencerminkan kebutuhan industri: reject rate, biaya pahat, waktu siklus, dan kualitas permukaan (Souza et al., 2026; Chang et al., 2025; Tang et al., 2025). Penelitian yang

menggabungkan metrik-metrik ini ke dalam rekomendasi parameter akan lebih cepat diterapkan.

4. KESIMPULAN

Literatur pada Teks dan Ris menunjukkan percepatan riset titanium alloy (khususnya Ti-6Al-4V) pada 2024–2026, dengan dua lokomotif: (i) rekayasa permukaan/material untuk meningkatkan wear resistance dan stabilitas antarmuka (Li et al., 2026; Ugodchikova et al., 2025; Belyavina et al., 2026), serta (ii) pemanfaatan ML/XAI untuk prediksi damage, klasifikasi keausan, dan dukungan keputusan proses (Song et al., 2026; Souza et al., 2026; Kim et al., 2025). Wawasan utama review ini adalah kebutuhan integrasi lintas-klaster: performa terbaik muncul ketika desain permukaan/material dipertimbangkan bersama desain proses manufaktur dan lapisan keputusan berbasis data. Agenda riset prioritas mencakup standardisasi dataset, generalisasi model, dan pengembangan coating yang “manufacturing-aware”. Dengan kerangka integratif tersebut, komunitas riset dan industri berpeluang mempercepat translasi inovasi—dari peningkatan kekerasan/coating di laboratorium menuju manufaktur titanium alloy yang lebih presisi, hemat biaya, dan andal.

REFERENSI

- Li, N., Fan, S., Duan, Y., Ma, L., Yang, A., Zheng, S., Peng, M., & Li, M. (2026). *Interface characteristics of microporous Al-Cr diffusion layers to improve wear resistance of Ti-6Al-4V*. Tribology International, 215, 111497.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111497>
- Song, X., Qi, H., Han, N., Hu, Y., Yang, W., & Li, Z. (2026). *Prediction of titanium alloy thread rolling damage based on machine learning assisted semi-coupled fracture criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 333, 111814.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111814>
- Souza, A.F., de Souza, L.L., Gaudencio, J.H.D., Silva, C.E.S., Verri, F.A.N., & Balestrassi, P.P. (2026). *Wear classification in Ti6Al4V machining using explainable machine learning: a decision support approach*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 48(2), 103.
<https://doi.org/10.1007/s40430-025-06078-8>
- Ugodchikova, A.V., Sedelnikova, M.B., Tolkacheva, T.V., Uvarin, P.V., Khimich, M.A., Sharkeev, Y.P., Kashin, A.D., & Glukhov,

- I.A. (2025). *Patterns of formation of micro-arc calcium phosphate coatings on different types of metal substrates*. Letters on Materials, 15(4), 263–269. <https://doi.org/10.48612/letters/2025-4-263-269>
- Belyavina, N.M., Kuryliuk, V.V., Kuryliuk, A.M., Stratiichuk, D.A., & Starik, S.P. (2026). *Synthesis of multicomponent (Ti,V)(C,N) solid solutions by high-pressure sintering of mechanically activated (TiH₂-Ti powder)-VN-C blends*. Next Materials, 10, 101366. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101366>
- Belyavina, N.M., Kuryliuk, A.M., Kogutyuk, P.P., & Ostapenko, R.V. (2025). *Kinetics of Interaction of IIT-4 Grade Ti with VN and Graphite during Mechanical Alloying*. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 47(5), 555–565. <https://doi.org/10.15407/mfint.47.05.0555>
- Chang, S., Liu, W., Tang, J., & Fan, M. (2025). *Cryogenic assisted abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy: Thermo-mechanical optimization and AI-based surface integrity prediction*. Sustainable Materials and Technologies, 46, e01685. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01685>
- Tang, J., Chen, S., Cao, W., Xie, H., Quan, X., & Ding, Q. (2025). *Tribological performance and lubrication mechanism of polyacrylamide as a high-efficiency water-based lubricant additive for titanium alloys*. Scientific Reports, 15(1), 19411. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00737-5>
- Shu, S., Hu, Z., Li, X., & Huang, Q. (2025). *Impact of active chip breakers on Ti6Al4V turning process*. Materials and Manufacturing Processes, 40(8), 1123–1132. <https://doi.org/10.1080/10426914.2025.2487270>
- Lisowicz, J., Krupa, K., Leksycki, K., Rusinek, R., & Wojciechowski, S. (2025). *Analysis of Tool Wear in Finish Turning of Titanium Alloy Ti-6Al-4V Under Minimum Quantity Lubrication Conditions Observed with Recurrence Quantification Analysis*. Materials, 18(1), 79. <https://doi.org/10.3390/ma18010079>
- Sebbe, N.P.V., Fernandes, F.D., Bernardi, H.H., Matsushima, J.T., & de Cássia Mendonça Sales-Contini, R. (2025). *Wear Behaviour and Machining Performance of PrimeCon Coating in Milling of Ti-6Al-4V*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 43–53. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96413-8_5
- Festas, A.J., Carvalho, S., & Davim, J.P. (2025). *Titanium alloys for medical applications - A brief review*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 14644207251350294. <https://doi.org/10.1177/14644207251350294>
- Kim, S., Kim, Y., Jeon, H.K., Jang, T.S., Lee, C.H., & Sugita, N. (2025). *Development of Volumetric Accuracy Enhancement Method for a 5-Axis Machine Tool Based on Sensitivity Analysis and Extraction Algorithm*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 26(10), 2671–2687. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01265-y>
- Seo, H., Kim, S., Kim, Y., Jeon, H.K., Jang, T.S., & Lee, C.H. (2025). *Performance Improvement of Volumetric Error Compensation in Five-Axis Machine Tool Based on Sensitivity Analysis and Extraction Algorithm*. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A, 49(10), 733–747. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2025.49.10.733>
- Sedehi, S.M.R., Palangani, N.F., Maleki, Z., & Banihashemi, S.F. (2025). *Effect of Conventional and Climb Milling on the Mechanical Properties and Biocompatibility of Pure Titanium; Application of the Williamson-Hall Method*. Iranian Journal of War and Public Health, 17(1), 51–61. <https://doi.org/10.58209/ijwph.1>