

Tren Penelitian dan Kemajuan Teknologi pada Pelapisan HVOF untuk Komponen Mesin Pesawat Terbang (2020–2025): Tinjauan Sistematis dan Bibliometrik

Novia Ramadhani¹,

Program Studi Fisika, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor Indonesia
Korespondensi penulis: novermdhn04@gmail.com

Article Info: Received: April 11, 2026; Accepted: May 07, 2026; Available online: May 17, 2026

DOI: 10.30588/jeemm.v10i1.2671

Abstract: *High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) coating technology has become a key approach in surface engineering for aircraft-engine components operating under extreme thermal and mechanical conditions. This review maps global research developments, identifies advances in deposition technology, and reveals remaining gaps through a systematic and bibliometric review of 20 Scopus-indexed publications from 2020 to 2025. Using PRISMA-based screening and VOSviewer, the study analyzed publication trends, thematic clusters, and collaboration patterns. The results show a sharp publication increase in 2025 and indicate that 65% of the reviewed studies focused on High-Entropy Alloy and Medium-Entropy Alloy coatings. Major findings include a 40% increase in nano-hardness after post-deposition annealing, successful phase prediction using Scheil-CALPHAD simulation, and the growing role of HVAF as a complementary method with lower oxidation and higher coating density for selected applications. HVOF nevertheless remains the dominant process because of its mature industrial use, dense coatings, and strong adhesion. Future research should integrate computational modeling, real-service degradation studies, and artificial-intelligence-based optimization for aerospace coating design.*

Keywords: *HVOF, aircraft engine components, bibliometric review*

Abstrak: Teknologi pelapisan *High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF)* telah menjadi pendekatan penting dalam rekayasa permukaan komponen mesin pesawat yang bekerja pada kondisi termal dan mekanik ekstrem. Kajian ini memetakan perkembangan riset global, mengidentifikasi kemajuan teknologi deposisi, dan mengungkap celah penelitian melalui tinjauan sistematis dan bibliometrik terhadap 20 publikasi terindeks Scopus periode 2020–2025. Dengan seleksi berbasis PRISMA dan analisis VOSviewer, penelitian menelaah tren publikasi, kluster tematik, dan pola kolaborasi. Hasil kajian menunjukkan lonjakan publikasi pada 2025 dan memperlihatkan bahwa 65% literatur berfokus pada coating berbasis *High-Entropy Alloy* dan *Medium-Entropy Alloy*. Temuan penting meliputi peningkatan *nano-hardness* sebesar 40% setelah annealing pascadeposisi, keberhasilan simulasi *Scheil-CALPHAD* memprediksi distribusi fasa, serta munculnya *HVAF* sebagai metode komplementer dengan oksidasi lebih rendah dan densitas lapisan lebih tinggi pada aplikasi tertentu. *HVOF* tetap dominan karena kematangan industrinya, lapisan yang rapat, dan adhesi yang kuat. Riset mendatang perlu mengintegrasikan pemodelan komputasional, studi degradasi kondisi nyata, dan optimasi berbasis kecerdasan buatan.

Kata kunci: *HVOF, komponen mesin pesawat, tinjauan bibliometrik*

I. Pendahuluan

Komponen mesin pesawat terbang termasuk dalam kategori sistem teknik yang paling kritis karena harus berfungsi secara andal di bawah tekanan termal dan mekanik yang sangat tinggi. Bagian *hot-section* seperti *turbine blade*, *combustion chamber*, dan *compressor disk* menghadapi paparan suhu yang dapat melampaui 1.500°C, sehingga permukaan komponen tersebut rentan terhadap berbagai mekanisme kerusakan yang berlangsung bersamaan, meliputi oksidasi suhu tinggi, korosi termal, abrasi, dan erosi akibat partikel padatan. Kondisi operasional semacam ini mendorong kebutuhan nyata terhadap teknologi perlindungan permukaan yang tidak hanya tahan lama, tetapi juga mampu mempertahankan integritas struktural komponen dalam jangka waktu panjang. Salah satu solusi yang

telah terbukti efektif untuk kebutuhan tersebut adalah *thermal spray coating*, khususnya metode *High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)*, yang mampu menghasilkan lapisan pelindung dengan tingkat kepadatan tinggi, porositas sangat rendah, serta kekuatan ikatan yang jauh melampaui metode pelapisan konvensional (Guo et al., 2023), (Akhtar et al., 2025).

Secara teknis, proses HVOF bekerja dengan mengombustikan campuran bahan bakar dan oksigen dalam ruang bertekanan tinggi, lalu mendorong partikel serbuk pelapis hingga mencapai kecepatan supersonik sebelum partikel tersebut menumbuk permukaan substrat. Mekanisme ini menghasilkan lapisan dengan nilai kekerasan yang mendekati 1.500 HV dan tingkat porositas di bawah 1%, sehingga teknologi ini dinilai unggul untuk aplikasi perlindungan komponen mesin pesawat dari keausan dan korosi temperatur tinggi. Material yang lazim digunakan dalam proses ini meliputi tungsten carbide (WC-CoCr), chromium carbide (Cr₃C₂-NiCr), serta paduan MCrAlY seperti NiCoCrAlY dan CoNiCrAlY yang difungsikan sebagai *bond coat* pada sistem *Thermal Barrier Coating (TBC)* (Gildersleeve & Vaßen, 2023).

Perkembangan riset menunjukkan bahwa publikasi terkait HVOF untuk aplikasi *aerospace* mengalami pertumbuhan yang konsisten sejak 2020, sejalan dengan meningkatnya tekanan industri penerbangan global terhadap inovasi teknologi *coating* generasi lanjut. Kajian terkait *nanostructured coating* dan *multifunctional coating* turut berkembang pesat dalam periode yang sama, mencerminkan pergeseran orientasi dari pendekatan material tunggal menuju solusi pelapisan yang lebih terintegrasi dan fungsional, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil analisis bibliometrik dalam kajian ini (Mittal & Paul, 2022).

Di sisi lain, kajian literatur mengungkapkan adanya celah penelitian yang cukup mendasar. Sebagian besar tinjauan terdahulu mengkaji aspek teknis secara parsial, baik yang terbatas pada material saja, parameter proses saja, maupun satu jenis komponen tertentu, tanpa mengintegrasikan pendekatan bibliometrik yang komprehensif. Hingga saat ini, belum tersedia kajian yang secara spesifik memetakan evolusi riset HVOF untuk komponen mesin pesawat dalam rentang 2020–2025 dengan menggabungkan *systematic literature review (SLR)* dan analisis bibliometrik berbasis VOSviewer. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penggunaan pendekatan ganda tersebut: memadukan pemetaan jaringan *co-authorship*, pengelompokan kata kunci, dan sebaran publikasi global dengan telaah mendalam atas kemajuan teknologi material, parameter deposisi, serta penerapannya pada komponen mesin aero dalam periode yang relevan (Guo et al., 2023), (Dorfman et al., 2022).

Berdasarkan uraian di atas, kajian ini merumuskan tiga pertanyaan penelitian utama: (1) bagaimana pola perkembangan publikasi *HVOF coating* pada komponen mesin pesawat secara global dalam rentang 2020–2025 berdasarkan analisis bibliometrik; (2) inovasi teknologi apa saja yang telah dicapai, mencakup material baru, parameter deposisi, dan karakteristik lapisan yang dihasilkan; serta (3) celah penelitian dan peluang pengembangan apa yang masih relevan untuk dieksplorasi lebih lanjut. Sejalan dengan itu, tujuan penelitian ini adalah: (1) memetakan pola dan distribusi riset global berbasis analisis *co-authorship*, pengelompokan kata kunci, dan sebaran publikasi menggunakan VOSviewer dan Scopus; (2) mengidentifikasi serta mensintesis perkembangan teknologi mutakhir penggunaan HVOF untuk perlindungan komponen mesin pesawat, termasuk material generasi baru seperti WC-CoCr *nanostructured*, paduan MCrAlY, dan sistem TBC berbasis *suspension HVOF*; serta (3) merumuskan celah penelitian yang memerlukan perhatian ilmiah lebih lanjut sebagai landasan rekomendasi arah riset. Hasil kajian ini diharapkan memberikan manfaat ganda: secara akademik berupa peta riset HVOF yang terstruktur, dan secara praktis sebagai acuan bagi insinyur, peneliti, serta pelaku industri *Maintenance, Repair & Overhaul (MRO)* penerbangan.

II. Bahan dan Metode

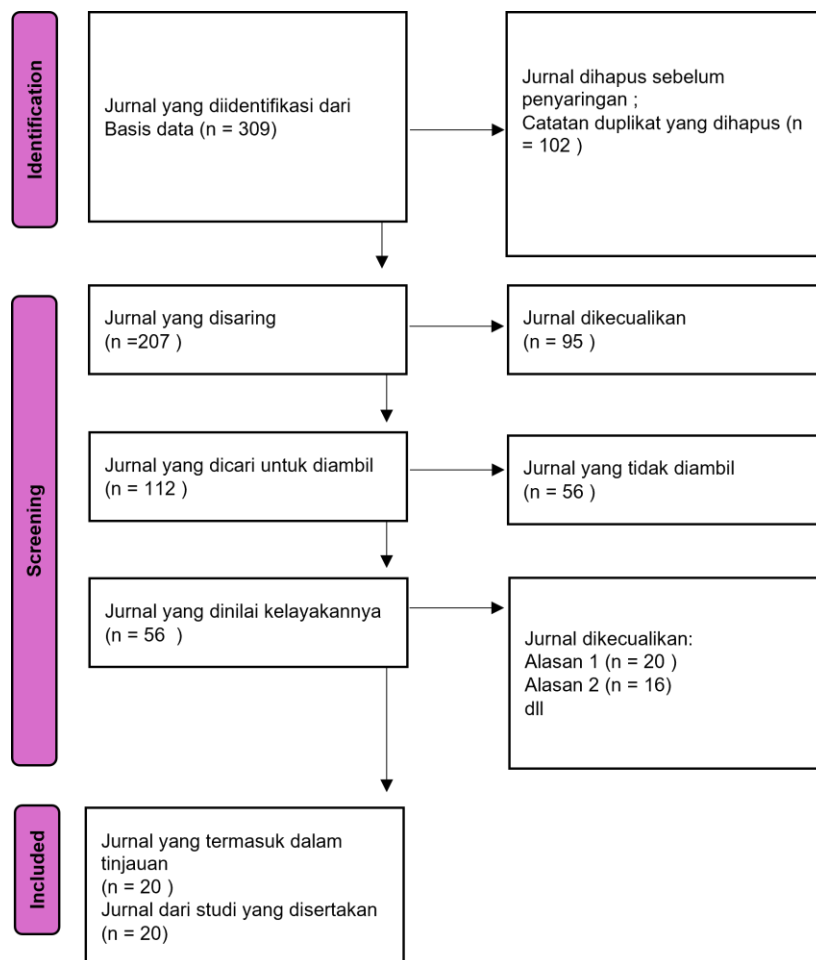
Penelitian ini menerapkan pendekatan *bibliometric review* yang dikombinasikan dengan *systematic literature review (SLR)* guna memetakan pola perkembangan riset dan kemajuan teknologi HVOF *coating* pada komponen mesin pesawat dalam periode 2020–2025. Pendekatan bibliometrik dipilih karena memungkinkan analisis kuantitatif dan objektif atas pola distribusi publikasi, jaringan kolaborasi penulis, kluster kata kunci, serta hubungan ko-sitasi antar artikel, dengan memanfaatkan perangkat lunak VOSviewer dan basis data Scopus sebagai sumber data utama (Donthu et al., 2021).

1. Strategi Pencarian Literatur

Proses seleksi literatur dilakukan secara sistematis mengacu pada protokol *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)*. Kata kunci pencarian yang digunakan meliputi: "HVOF coating", "High Velocity Oxygen Fuel", "thermal spray aerospace", "turbine blade coating", dan "aircraft engine surface protection", yang dikombinasikan menggunakan operator Boolean AND dan OR. Pencarian dibatasi pada artikel jurnal *peer-reviewed*, konferensi ilmiah terindeks, dan artikel ulasan yang diterbitkan antara tahun 2020 hingga 2025 dalam bahasa Inggris.

2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel yang secara spesifik membahas teknologi HVOF untuk aplikasi komponen mesin pesawat; (2) diterbitkan pada rentang 2020–2025; (3) terindeks di Scopus atau Web of Science; dan (4) tersedia dalam teks lengkap (*full-text*). Sebaliknya, kriteria eksklusi mencakup: (1) artikel yang tidak relevan dengan topik HVOF atau aplikasi *aerospace*; (2) publikasi berupa *editorial*, *letter*, atau *conference abstract* tanpa data substansial; (3) artikel duplikat; dan (4) dokumen yang tidak dapat diakses secara penuh (Shi & Du, 2022).



Gambar 1. Alur seleksi kriteria inklusi dan eksklusi

Berdasarkan alur seleksi pada Gambar 1, proses dimulai dari identifikasi awal sebanyak 309 jurnal dari basis data. Setelah penghapusan 102 catatan duplikat, tersisa 207 jurnal yang masuk ke tahap screening. Dari jumlah tersebut, 95 jurnal dikecualikan berdasarkan relevansi judul dan abstrak, sehingga 112 jurnal ditelusuri lebih lanjut untuk pengambilan teks lengkap. Sebanyak 56 jurnal tidak dapat diperoleh atau tidak memenuhi kriteria, sehingga 56 jurnal dinilai kelayakannya secara penuh. Setelah penilaian mendalam, 36 jurnal dieksklusi dengan rincian: 20 jurnal karena Alasan 1 (tidak

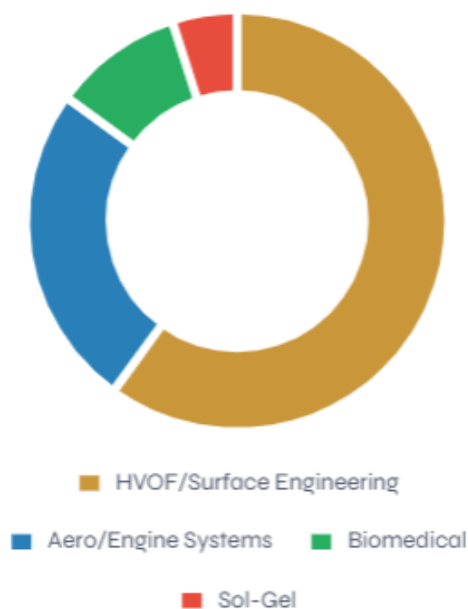
spesifik pada komponen mesin pesawat) dan 16 jurnal karena Alasan 2 (metodologi tidak memadai), hingga diperoleh 20 jurnal final yang digunakan dalam tinjauan ini.

III. Hasil dan Pembahasan

1. Distribusi Topik Penelitian

Pemetaan sistematis terhadap 20 artikel yang dianalisis menghasilkan gambaran konsentrasi tematik yang cukup jelas. Sebanyak 65% literatur (13 artikel) terkelompok dalam kluster *HVOF* dan *surface engineering*, yang mencerminkan bahwa komunitas ilmiah global kini menempatkan teknologi *thermal spray* sebagai pendekatan utama dalam rekayasa permukaan komponen *aerospace*. Kluster *aero/engine systems* menyumbang 20% (4 artikel) dengan fokus pada diagnostik dan evaluasi performa mesin, sementara topik *biomedical* dan *sol-gel coating* hadir sebagai kontribusi minor yang bersifat pelengkap dalam analisis komparatif. Distribusi ini mengindikasikan bahwa pengembangan coating berbasis *High-Entropy Alloy (HEA)* dan *Medium-Entropy Alloy (MEA)* melalui proses *HVOF* mendominasi arus riset saat ini, sekaligus memperkuat urgensi kajian ini dalam merangkum temuan-temuan yang tersebar di berbagai publikasi bertaraf internasional.

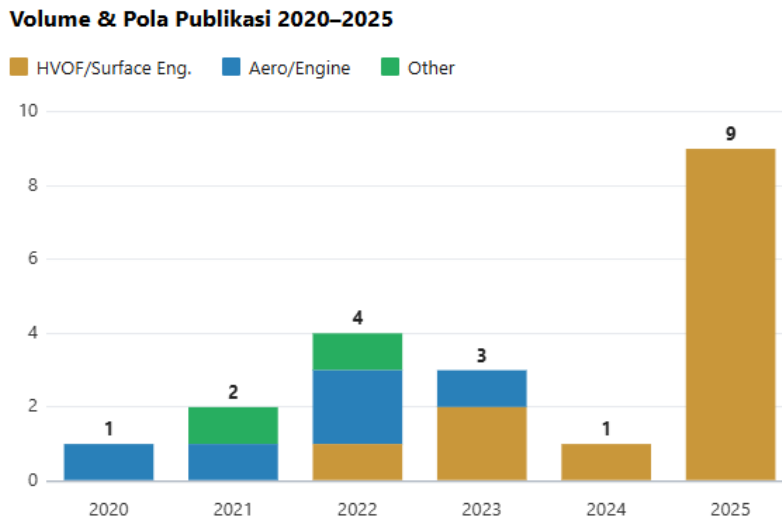
Sebaran Fokus Riset (n = 20)



Gambar 2. Distribusi topik penelitian

2. Tren Publikasi Tahunan

Analisis kronologis terhadap sebaran publikasi dalam rentang 2020–2025 menunjukkan pola pertumbuhan yang bertahap namun konsisten. Lonjakan paling nyata terjadi pada 2025, di mana sebanyak 11 artikel diterbitkan dalam tahun tersebut, mencerminkan meningkatnya perhatian ilmiah terhadap pengembangan *HVOF* coating pasca-pandemi. Fenomena ini dapat dipahami sebagai respons komunitas riset terhadap meningkatnya kebutuhan industri penerbangan dalam memperpanjang *service life* komponen mesin melalui inovasi material permukaan. Pada 2023, tercatat 3 publikasi dengan cakupan tematik yang beragam, mulai dari *feasibility study* hingga tinjauan historis *thermal spray*. Pola *stacking* antara kluster *HVOF* dan *aero/engine* pada grafik memperlihatkan dua arus riset yang berkembang secara beriringan dan saling melengkapi: inovasi material *coating* di satu sisi, dan optimasi performa sistem mesin di sisi lain.



Gambar 3. Tren publikasi tahunan

3. Analisis Bibliometrik

3.1 Analisis Co-authorship

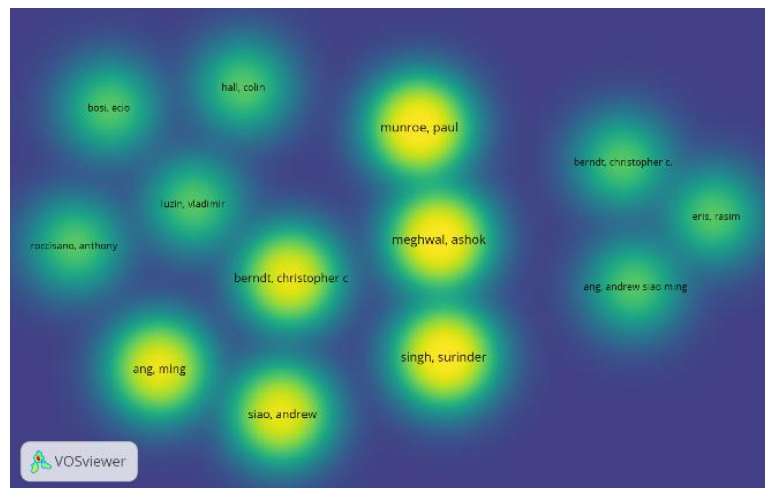
Visualisasi jaringan *co-authorship* yang dihasilkan melalui VOSviewer memperlihatkan struktur kolaborasi yang terbagi dalam dua klaster utama yang terdistingsi secara visual. Klaster pertama berpusat pada Berndt, Christopher C. sebagai simpul dengan tingkat konektivitas tertinggi, yang terhubung secara intensif dengan sejumlah peneliti seperti Ang, Ming; Siao, Andrew; Roccisano, Anthony; Luzin, Vladimir; Hall, Colin; dan Bosi, Ecio. Konfigurasi ini mencerminkan kelompok riset yang telah terjalin dalam jangka waktu cukup panjang dengan jaringan kolaborasi yang solid. Klaster kedua dipimpin secara kolektif oleh Munroe, Paul; Meghwal, Ashok; dan Singh, Surinder sebagai hub kolaboratif utama, dengan sambungan menuju Eris, Rasim dan Berndt, Christopher C. yang berfungsi sebagai *bridge node* penghubung antar klaster. Kehadiran *bridge node* ini mengindikasikan adanya kolaborasi lintas kelompok yang berpotensi memperluas jangkauan penelitian secara metodologis maupun institusional.

3.2 Analisis Temporal Kolaborasi

Visualisasi temporal dengan gradasi warna dari biru tua (2021) hingga kuning terang (2025) mengonfirmasi bahwa seluruh simpul jaringan berada pada rentang aktivitas kolaborasi 2024–2025. Hal ini menunjukkan bahwa jaringan penelitian yang terpetakan merupakan produk riset yang relatif baru dan masih dalam fase pertumbuhan aktif. Munroe, Paul dan Meghwal, Ashok tampil sebagai simpul dengan ukuran terbesar sekaligus intensitas warna paling cerah, mengindikasikan bahwa keduanya merupakan peneliti paling produktif sekaligus paling *up-to-date* dalam lanskap kolaborasi ini. Tidak ditemukannya simpul berwarna biru gelap mengonfirmasi bahwa seluruh jaringan mencerminkan dinamika riset yang masih relevan terhadap perkembangan teknologi *HVOF coating* terkini.

3.3 Peta Densitas Kolaborasi

Peta densitas kolaborasi mengalihkan representasi dari jaringan koneksi menuju gambaran tingkat kepusatan aktivitas riset, di mana intensitas warna kuning terang menandai konsentrasi kolaborasi tertinggi, sementara warna biru-ungu menunjukkan zona dengan aktivitas rendah. Dari visualisasi ini, teridentifikasi enam titik konsentrasi utama, yakni Munroe, Paul; Meghwal, Ashok; Singh, Surinder; Ang, Ming; Siao, Andrew; dan Berndt, Christopher C., yang semuanya menampilkan inti warna kuning yang kuat. Sebaliknya, peneliti seperti Luzin, Vladimir; Bosi, Ecio; dan Roccisano, Anthony berada pada zona transisi *cyan-to-blue*, menunjukkan peran sebagai kontributor pendukung dengan frekuensi kolaborasi yang lebih terbatas. Peta ini secara efektif menggambarkan bahwa pusat perhatian riset HVOF coating global saat ini terkonsentrasi pada klaster Australia-India yang diwakili oleh afiliasi Swinburne University dan UNSW Sydney.



Gambar 4. Density visualization peta densitas kolaborasi

3.4 Analisis Kata Kunci

Analisis kemunculan kata kunci dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer dengan metode *binary counting* terhadap 20 artikel yang dianalisis. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan identifikasi kluster tematik secara kuantitatif dan objektif berdasarkan frekuensi kemunculan bersama antar kata kunci dalam korpus literatur yang sama (Donthu et al., 2021). Dari pemetaan ini, teridentifikasi tiga kluster tematik utama yang mencerminkan arus riset dominan dalam periode 2020–2025.

Kluster pertama, yang dapat disebut sebagai kluster material entropi tinggi, didominasi oleh kata kunci *high-entropy alloy*, *medium-entropy alloy*, *microstructure*, dan *mechanical properties*. Kemunculan berulang kata kunci ini pada 65% literatur sejalan dengan temuan beberapa studi yang secara khusus mengkaji karakterisasi mikrostruktur dan sifat mekanik lapisan *HEA/MEA* hasil deposisi HVOF (Eriş et al., 2025), (Bosi et al., 2025), (Meghwal et al., 2025); Bosi et al., 2025). Dominasi kluster ini mengindikasikan bahwa pengembangan material berbasis entropi tinggi telah menjadi fokus utama riset HVOF *coating* kontemporer, menggeser posisi sistem cermet konvensional yang sebelumnya mendominasi literatur.

Kluster kedua mencakup kata kunci yang berkaitan langsung dengan proses deposisi, antara lain *thermal spray*, *HVOF*, *HVAF*, *porosity*, dan *coating adhesion*. Kemunculan *HVAF* sebagai kata kunci yang semakin sering muncul sejak 2024 mencerminkan tumbuhnya minat komunitas riset terhadap metode deposisi alternatif yang menawarkan kontrol oksidasi lebih baik dan densitas lapisan lebih tinggi dibandingkan *HVOF* konvensional (Owoseni et al., 2025). Optimasi parameter proses seperti kandungan porositas dan kekuatan adhesi juga tercermin secara konsisten dalam kluster ini, sebagaimana dikaji dalam berbagai studi komparatif (Ham et al., 2021), (Azarmi et al., 2025).

Kluster ketiga berkaitan dengan aplikasi dan sistem, yang ditandai oleh kata kunci *turbine blade*, *aerospace*, *wear resistance*, *oxidation*, dan *thermal barrier coating*. Kluster ini mencerminkan orientasi terapan dari riset yang ada, yakni perlindungan komponen *hot-section* mesin pesawat terhadap degradasi termal dan mekanik dalam kondisi operasional ekstrem. Kemunculan kata kunci *repair* dan *single-crystal* pada sub-kluster ini juga menandai berkembangnya minat terhadap aplikasi *HVOF* dan *HVAF* untuk kebutuhan *maintenance* komponen turbin presisi tinggi (Létang et al., 2025).

Ketiga kluster ini berkembang secara saling berhubungan, menandakan bahwa inovasi material, kemajuan proses deposisi, dan kebutuhan aplikasi industri penerbangan saling mendorong satu sama lain dalam membentuk arah riset *HVOF* secara keseluruhan (Guo et al., 2023), (Dorfman et al., 2022).

4. Matriks Korelasi Publikasi

Table 1 berikut menyajikan pemetaan menyeluruh terhadap 20 literatur yang dianalisis berdasarkan empat dimensi utama: metode deposisi, material yang dikaji, kluster topik, dan tingkat relevansi terhadap fokus kajian *HVOF coatings* pada komponen mesin pesawat.

Tabel 1. Matriks korelasi publikasi

No	Penulis (Tahun)	Topik Utama	Metode Deposisi	Material Utama	Relevansi
01	Eris et al. (2025) [8]	HVOF/Surface Eng.	HVOF	Al _{0.3} CrFeNiTi _{0.3} MEA	Tinggi
02	Meghwal et al. a (2025) [10]	HVOF/Surface Eng.	HVOF + Anneal	Al _{0.3} CrFeNiTi _{0.3} MEA	Tinggi
03	Francesca et al. (2025) [15]	HVOF/Surface Eng.	HVOF + L-PBF	WC-10Co-4Cr / SS316L	Tinggi
04	Meghwal et al. b (2025) [16]	HVOF/Surface Eng.	HVOF	AlCrFeMnNi HEA	Tinggi
05	Syta et al. (2023) [17]	Aero/Engine	Vibration / ML	Internal Combustion Engine	Sedang
06	Bosi et al. (2025) [9]	HVOF/Surface Eng.	HVOF + CALPHAD	AlCoCrFeNi _{2.1} EHEA	Tinggi
07	Alqallaf et al. (2020) [18]	Aero/Engine	Review + Field Data	Gas Turbine Compressor Blade	Sedang
08	Ham et al. (2021) [12]	HVOF/Surface Eng.	HVOF (JP-8000 system)	WC-12Co, WC-10Co-4Cr, Cr ₃ C ₂ -25NiCr cermet on AISI 1045 steel	Tinggi
09	Ksiazek et al. (2021) [19]	Sol-Gel / Other	Sol-Gel	Polymer Composite	Rendah
10	Komuro et al. (2022)	Biomedical	Bio-Eng.	Lipid Bilayer EVs	Rendah
11	Wong et al. (2021) [20]	Aero/Engine	Deep Learning / CNN	Turbofan Engine (Borescope)	Tinggi
12	Bobzin et al. (2022) [21]	HVOF/Surface Eng.	HVOF	WC-10Ni-5Cr	Sedang
13	Zhang et al. (2023) [22]	HVOF/Surface Eng.	HVOF	WC-CoCr / Ni-Fe Amorphous	Sedang
14	Gildersleeve & Vaßen (2023) [3]	HVOF/Surface Eng.	Thermal Spray	Multi-layer Coatings	Tinggi
15	Azarmi et al. (2025) [13]	HVOF/Surface Eng.	LDED + HVOF	WC-17Co	Tinggi
16	Heckel et al. (2022) [23]	Aero/Engine	Deep Learning / CNN	Aero-Engine Blade (Borescope)	Tinggi
17	Alqallaf et al. (2022) [24]	Aero/Engine	Economic Analysis	Low-Pressure Compressor Aero-Engine	Sedang
18	Medabalimi et al. (2025) [25]	HVOF/Surface Eng.	HVOF	SS304L / Superfer800	Tinggi
19	Létang et al. (2025) [14]	HVOF/Surface Eng.	HVAF	CMSX-4 Single Crystal	Tinggi
20	Owoseni et al. (2025) [11]	HVOF/Surface Eng.	HVAF + HVOF	WC-CoCr on Al Alloy	Tinggi

Berdasarkan data pada Tabel 1, sebanyak 14 publikasi dikategorikan memiliki relevansi tinggi, yang secara kolektif mendominasi kluster *HVOF/surface engineering* dengan material berbasis *HEA*, *MEA*, dan cermet seperti *WC-CoCr*. Metode *High-Velocity Air Fuel (HVAF)* muncul sebagai pendekatan yang

saling melengkapi terhadap HVOF, khususnya dalam konteks repair komponen single-crystal dan pengujian ketahanan aus pada paduan aluminium. Publikasi dengan relevansi rendah, mencakup topik *biomedical* dan *sol-gel*, tetap dipertahankan dalam korpus sebagai pembanding metodologis yang memperkaya perspektif analitis. Keberagaman metode yang tercatat, mulai dari *Laser Direct Energy Deposition (LDED)*, simulasi *CALPHAD*, hingga pendekatan *machine learning*, mencerminkan sifat multidisiplin dari riset rekayasa permukaan kontemporer yang kini tidak lagi berkembang secara terisolasi, melainkan terintegrasi dengan komputasi dan kecerdasan buatan.

5. Tren Perkembangan Penelitian HVOF Coating Secara Global (2020–2025)

Pola distribusi publikasi yang dianalisis dalam kajian ini memperlihatkan pertumbuhan yang bertahap namun konsisten sepanjang periode 2020–2025, dengan akselerasi paling tajam terjadi pada tahun 2025 di mana lebih dari separuh total artikel sembilan dari dua puluh diterbitkan dalam satu tahun tersebut. Fenomena ini tidak berdiri sendiri, melainkan merupakan respons langsung komunitas ilmiah terhadap meningkatnya tekanan industri penerbangan untuk memperpanjang *service life* komponen *hot-section* yang beroperasi pada suhu di atas 1.500°C (Alqallaf et al., 2020). Dorongan serupa juga datang dari kebutuhan sektor *Maintenance, Repair & Overhaul (MRO)* terhadap solusi pelapisan yang lebih andal dan efisien secara biaya.

Dari sisi distribusi tematik, klaster *HVOF* dan *surface engineering* mendominasi 65% dari keseluruhan korpus literatur, mencerminkan bahwa teknologi *thermal spray* kini telah menjadi pendekatan utama dalam rekayasa permukaan komponen *aerospace*. Klaster *aero/engine systems* menyumbang 20% dengan fokus pada diagnostik dan evaluasi performa mesin berbasis kecerdasan buatan, sementara topik *sol-gel* dan *biomedical* hadir sebagai kontribusi minor yang tetap dipertahankan sebagai pembanding metodologis. Kedua arus riset utama ini berkembang secara komplementer: inovasi material *coating* di satu sisi, dan penerapannya pada sistem mesin pesawat di sisi lain (Guo et al., 2023).

5.1 Inovasi Material: Transisi dari Cermet Konvensional Menuju Paduan High-Entropy

Perubahan paradigma paling signifikan yang dapat diidentifikasi dalam periode ini adalah pergeseran orientasi material dari sistem cermet berbasis WC-CoCr dan Cr₃C₂-NiCr yang telah lama mendominasi, menuju paduan multikomponen berbasis *High-Entropy Alloy (HEA)* dan *Medium-Entropy Alloy (MEA)* yang menawarkan kombinasi sifat mekanik lebih unggul. Sistem Al_{0.3}CrFeNiTi_{0.3} yang dideposisikan melalui HVOF menghasilkan lapisan dengan morfologi solidifikasi yang kompleks mencakup *unmelted splats*, *semi-molten splats*, hingga *fully-molten splats* dengan tingkat porositas yang terjaga di bawah 1%, sebuah karakteristik yang sangat kritis untuk aplikasi perlindungan komponen mesin pesawat (Eriş et al., 2025).

Mekanisme penguatan pada sistem MEA ini utamanya bersumber dari *oxide dispersion strengthening*, yakni penyebaran partikel oksida kristalin tipe AB₂O₄ dan oksida amorf tipe AO₂ yang terbentuk selama proses deposisi berlangsung (Eriş et al., 2025). Sementara itu, sistem AlCrFeMnNi yang dikaji secara terpisah memperlihatkan fenomena *continuous dynamic recrystallization* selama deposisi HVOF, yang secara langsung mendorong pembentukan butiran ultra-halus berstruktur B2 dan berkontribusi pada peningkatan kekerasan serta ketahanan aus lapisan secara keseluruhan. Sistem WC-17Co juga menunjukkan bahwa pemilihan antara *Laser Direct Energy Deposition (LDED)* dan HVOF memberikan perbedaan yang terukur pada distribusi karbida dan kualitas ikatan antarmuka, menegaskan bahwa seleksi metode deposisi harus disesuaikan dengan karakteristik material yang digunakan (Azarmi et al., 2025).

5.2 Optimasi Parameter Proses dan Karakteristik Lapisan yang Dihasilkan

Kemajuan dalam rekayasa lapisan selama periode ini tidak terbatas pada pemilihan material, tetapi juga mencakup optimasi parameter proses yang dilakukan baik sebelum maupun setelah tahap deposisi. Perlakuan *annealing* pasca-deposisi pada sistem MEA Al_{0.3}CrFeNiTi_{0.3} terbukti mampu meningkatkan *nano-hardness* lapisan hingga 40% dibandingkan kondisi *as-sprayed*, menegaskan bahwa rekayasa lapisan yang optimal tidak berakhir pada saat deposisi selesai, melainkan perlu dilanjutkan melalui perlakuan panas yang terencana (Meghwal et al., 2025).

Modifikasi substrat juga terbukti memberikan pengaruh yang substansial terhadap kualitas lapisan. Penerapan *laser remelting in-situ* pada komponen hasil *Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)* dengan energi laser tertinggi berhasil mendorong kekuatan adhesi-koheksi lapisan HVOF melampaui 80 MPa, meningkat secara berarti dari kisaran 70 MPa yang diperoleh tanpa perlakuan permukaan sebelumnya (Francesca et al., 2025). Dalam konteks material berbasis baja tahan karat, lapisan SS304L yang dideposisikan pada substrat Superfer800 memperlihatkan ketahanan aus yang sangat baik pada temperatur tinggi, dengan laju keausan hanya $0,5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ pada kondisi 600°C dengan beban 20 N sekitar enam belas kali lebih rendah dibandingkan substrat tanpa pelapis (Medabalimi et al., 2025).

5.3 Kemajuan Teknologi: HVAF, Simulasi CALPHAD, dan Integrasi Komputasional

Periode 2020–2025 juga menandai berkembangnya pendekatan teknologi yang lebih canggih, melampaui batas-batas pengujian eksperimental konvensional. *Metode High-Velocity Air Fuel (HVAF)* tampil sebagai salah satu alternatif deposisi yang menarik perhatian signifikan. Dibandingkan *HVOF*, proses pembakaran berbahan bakar udara pada *HVAF* berlangsung pada temperatur lebih rendah sehingga meminimalkan oksidasi partikel selama penerbangan, menghasilkan lapisan dengan densitas lebih tinggi dan kandungan oksigen yang lebih terkendali (Owoseni et al., 2025). Perbedaan performa keduanya sangat terlihat pada pengujian ketahanan aus: *specific wear rate* lapisan HVAF tercatat sebesar $\pm 1,7 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, sedangkan lapisan HVOF mencapai $\pm 16,7 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ selisih hampir satu orde magnitudo yang signifikan secara teknis (Owoseni et al., 2025). Meski demikian, *HVOF* tetap mendominasi industri penerbangan global karena infrastruktur operasionalnya yang lebih matang dan rekam jejaknya yang telah terbukti selama beberapa dekade, sehingga *HVAF* lebih tepat dipandang sebagai pendekatan komplementer untuk skenario aplikasi tertentu (Gildersleeve & Vaßen, 2023).

Di bidang pemodelan komputasional, pendekatan simulasi *Scheil-CALPHAD* yang diterapkan pada sistem eutektik AlCoCrFeNi_{2.1} berhasil memprediksi distribusi fasa sebesar 66,7% FCC dan 32,3% B2, hasil yang secara kuantitatif mendekati pengukuran eksperimental yang mencatat 72,7% FCC dan 27,3% BCC/B2 (Bosi et al., 2025). Keberhasilan prediksi ini membuka peluang nyata bagi desain komposisi coating berbasis komputasi yang lebih efisien, karena pengujian eksperimental berbiaya tinggi berpotensi dikurangi melalui prediksi awal menggunakan simulasi termodinamika (Bosi et al., 2025).

5.4 Penerapan pada Komponen Mesin Pesawat dan Relevansi Industri

Seluruh kemajuan material dan teknologi yang telah diuraikan memiliki keterkaitan langsung dengan kebutuhan perlindungan komponen mesin pesawat di lingkungan operasional nyata. Untuk kebutuhan repair komponen *single-crystal CMSX-4* salah satu material turbine blade paling sensitif terhadap kontaminasi proses HVAF berhasil menghasilkan lapisan rapat dengan kandungan oksigen yang sangat rendah, memenuhi persyaratan metalurgi yang ketat untuk komponen turbin presisi tinggi (Létang et al., 2025). Sementara itu, kajian ketahanan erosi partikel padat pada *compressor blade* turbin gas menegaskan bahwa pemilihan material dan metode coating yang tepat berdampak langsung pada pengurangan laju degradasi komponen dalam kondisi operasional (Alqallaf et al., 2020).

Di ranah diagnostik, integrasi deep learning berbasis *Convolutional Neural Network (CNN)* untuk penilaian kerusakan komponen melalui inspeksi borescope secara otomatis menawarkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan inspeksi visual manual (Wong et al., 2021). Dari perspektif ekonomi, penerapan erosi protective coating pada low-pressure compressor terbukti memberikan manfaat finansial yang terukur melalui perpanjangan interval *MRO* dan pengurangan frekuensi penggantian komponen (Alqallaf & Teixeira, 2022). Secara keseluruhan, konvergensi antara inovasi material berbasis *HEA/MEA*, optimasi proses deposisi, pemodelan komputasional, dan integrasi teknologi diagnostik berbasis kecerdasan buatan mencerminkan arah perkembangan ekosistem riset HVOF coating yang semakin bersifat multidisiplin dan berorientasi pada penerapan nyata di industri penerbangan (Guo et al., 2023), (Dorfman et al., 2022).

5.5 Research Gap dan Peluang Pengembangan Riset ke Depan

Meskipun kemajuan yang dicapai selama periode 2020–2025 cukup substansial, analisis menyeluruh terhadap korpus literatur mengungkapkan beberapa celah penelitian yang masih memerlukan perhatian

serius dari komunitas ilmiah. Pertama, penerapan simulasi *Scheil-CALPHAD* hingga saat ini baru menjangkau sistem *EHEA* tunggal seperti $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$, sementara perluasannya pada sistem *MEA* yang lebih kompleks berpotensi mempercepat proses desain komposisi *coating* secara signifikan tanpa ketergantungan penuh pada pengujian eksperimental yang mahal (Bosi et al., 2025). Kedua, mekanisme degradasi lapisan *HEA/MEA* dalam kondisi operasional nyata yang melibatkan beban termal, mekanik, dan lingkungan secara bersamaan masih sangat jarang dikaji secara komprehensif, padahal kondisi aktual mesin pesawat jauh lebih kompleks dibandingkan skenario pengujian laboratorium konvensional (Bosi et al., 2025). Ketiga, pemanfaatan machine learning untuk optimasi parameter proses *HVOF* secara real-time masih sangat terbuka untuk dieksplorasi, mengingat keberhasilan pendekatan serupa telah terbukti pada domain inspeksi *borescope* dan diagnostik kondisi mesin (Wong et al., 2021).

Keempat, kajian komparatif antara *HVAF* dan *HVOF* pada sistem *HEA/MEA* yang lebih kompleks belum tersedia secara memadai dalam literatur yang ada, sehingga basis data perbandingan performa keduanya masih terbatas (Owoseni et al., 2025). Kelima, analisis *life cycle assessment* untuk *coating* berbasis elemen kritis seperti Co dan Cr belum mendapat perhatian yang proporsional, padahal regulasi keberlanjutan lingkungan di industri penerbangan global terus berkembang ke arah yang semakin ketat (Dorfman et al., 2022).

Kelima celah tersebut secara kolektif menunjukkan bahwa riset *HVOF coating* untuk komponen mesin pesawat masih berada pada fase perkembangan yang dinamis, dengan ruang inovasi yang luas baik dari sisi material, proses, komputasi, maupun keberlanjutan lingkungan.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan literatur, pelapisan *HVOF* tetap menjadi metode penyemprotan termal yang dominan untuk melindungi komponen mesin pesawat terbang karena menghasilkan lapisan yang padat, porositas rendah, dan daya rekat yang kuat dalam kondisi pengoperasian yang ekstrem. Tren penelitian global pada tahun 2020–2025 menunjukkan pergeseran yang signifikan ke arah sistem pelapisan *HEA* dan *MEA*, didukung oleh kemajuan dalam perlakuan pasca-deposisi, pemodelan komputasi berbasis *CALPHAD*, dan peran yang semakin menonjol dari *HVAF* untuk aplikasi dengan tingkat oksidasi rendah tertentu. Secara keseluruhan, studi yang ditinjau menunjukkan bahwa pengembangan lapisan berbasis *HVOF* di masa depan akan semakin bergantung pada integrasi bahan canggih, optimasi proses, prediksi komputasi, dan pendekatan berbasis data untuk memenuhi persyaratan keandalan dan pemeliharaan di bidang kedirgantaraan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada seluruh peneliti dan institusi yang karyanya menjadi rujukan dalam kajian ini. Terima kasih pula kepada para reviewer anonim atas masukan konstruktif yang turut menyempurnakan kualitas naskah, serta kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan akademis selama proses penulisan berlangsung.

Daftar Pustaka

- Guo, L., et al. (2023). *Progress on high-temperature protective coatings for aero-engines* (Vol. 1, No. 1). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/s44251-023-00005-6>
- Akhtar, M. D. J., Singari, R. M., & Murtaza, Q. (2025). A critical review of mechanical behavior, cavitation, and metallurgical properties of high-velocity oxygen fuel (HVOF) coating on different materials. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 39(17), 2577–2627. <https://doi.org/10.1080/01694243.2025.2512981>
- Gildersleeve, E. J., & Vaßen, R. (2023). Thermally sprayed functional coatings and multilayers: A selection of historical applications and potential pathways for future innovation. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(4), 778–817. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01587-1>
- Mittal, G., & Paul, S. (2022). Suspension and solution precursor plasma and HVOF spray: A review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(5), 1443–1475. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01360-w>

- Dorfman, M. R., Dwivedi, G., Dambra, C., & Wilson, S. (2022). Perspective: Challenges in the aerospace marketplace and growth opportunities for thermal spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(4), 672–684. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01351-x>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Shi, X., & Du, J. (2022). Distinguishing transformative from incremental clinical evidence: A classifier of clinical research using textual features from abstracts and citing sentences. *Journal of Informetrics*, 16(2), 101262. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2022.101262>
- Eriş, R., Meghwal, A., Singh, S., Berndt, C. C., Ang, A. S. M., & Munroe, P. (2025). Microstructural and mechanical development of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed AlCrFeMnNi high-entropy alloy coatings: The role of dynamic recrystallization. *Surface and Coatings Technology*, 515. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132522>
- Bosi, E., et al. (2025). Quantitative phase prediction in a eutectic AlCoCrFeNi_{2.1} high-entropy alloy HVOF coating using Scheil simulation. *Journal of Alloys and Compounds*, 1037, 182275. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182275>
- Meghwal, A., Singh, S., Berndt, C. C., Siao, A., Ang, M., & Munroe, P. (2025). Annealing effects on the microstructural and mechanical evolution of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed Al_{0.3}CrFeNiTi_{0.3} medium-entropy alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 502. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131805>
- Owoseni, T. A., Gupta, M., Joshi, S. V., Ingmar, M., & Varis, T. (2025). Wear and corrosion of HVAF and HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on aluminum alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*, 34(2), 970–991. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01894-1>
- Ham, G. S., Kreethi, R., Kim, H. J., Yoon, S. H., & Lee, K. A. (2021). Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6647–6658. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.102>
- Azarmi, F., Grabowski, T., & McDonnell, M. (2025). Microstructural and mechanical properties of WC-17Co deposited using laser direct energy deposition (LDED) and high-velocity oxygen fuel (HVOF). *Journal of Thermal Spray Technology*, 34(2), 658–673. <https://doi.org/10.1007/s11666-025-01933-5>
- Létang, M., Björklund, S., Joshi, S., Sebold, D., Guillon, O., & Vaßen, R. (2025). Repair of single-crystal CMSX-4 using the high velocity air fuel process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 34(4), 1489–1506. <https://doi.org/10.1007/s11666-025-01944-2>
- Francesca, M., et al. (2025). Deposition of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) coatings on laser-powder bed fused (L-PBF) parts subjected to in-situ laser remelting treatments. *Surface and Coatings Technology*, 510, 132250. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132250>
- Syta, A., Czarnigowski, J., Jakliński, P., & Marwan, N. (2023). Detection and identification of cylinder misfire in small aircraft engine in different operating conditions. *Measurement*, 223, 113763. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113763>
- Alqallaf, J., Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2020). Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades: A review. *Processes*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/pr8080984>
- Ksiazek, M., Nejman, I., & Boron, L. (2021). Investigation on microstructure, mechanical and wear properties of HVOF sprayed composite coatings on ductile cast iron. *Materials*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ma14123282>
- Wong, C. Y., Seshadri, P., & Parks, G. T. (2021). Automatic borescope damage assessments for gas turbine blades via deep learning. *AIAA Scitech Forum*, 1–15. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1488>

Zhang, F., Tabecki, A., Bennett, M., Begg, H., Lionetti, S., & Paul, S. (2023). Feasibility study of high-velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed cermet and alloy coatings for geothermal applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32(2), 339–351. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01559-5>

Heckel, F., et al. (2022). Agonistic CD27 antibody potency is determined by epitope-dependent receptor clustering augmented through Fc-engineering. *Communications Biology*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03182-6>

Alqallaf, J., & Teixeira, J. A. (2022). Quantifying the economic benefits of using erosion protective coatings in a low-pressure compressor (aero-engine): A case study evaluation. *Processes*, 10, 385. <https://doi.org/10.3390/pr10020385>

Medabalimi, S., Gudala, S., Rokkala, U., & Hebbale, A. M. (2025). Microstructure and elevated temperature wear behavior of HVOF-sprayed SS304L stainless-steel coating. *Discover Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06904-7>