

SIFAT MEKANIK, KETAHANAN AUS, DAN KOROSI LAPISAN COLD SPRAY PADUAN LOGAM: SLR

Muhammad Khalikul Fadly¹⁾, Donny Fernandez², Muslim³, Toto Sugiarto⁴
Departemen Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang^{1,2}
rifdarmon@gmail.com¹,

Abstract: Cold spray is a rapidly advancing solid-state deposition technology for coating and repairing metal-alloy components, valued for minimizing oxidation and phase transformation compared to conventional thermal spray. This study analyzes research trends on mechanical properties, wear resistance, corrosion, and fatigue/fracture mechanisms of cold-sprayed metal-alloy coatings from 2020-2025 publications, using a Systematic Literature Review (SLR) guided by PRISMA 2020. Literature searching via Publish or Perish on the Scopus database yielded 200 initial records; after title screening and eligibility assessment, 18 articles met the inclusion criteria for synthesis. Results show: (1) research concentrated in 2020 (9 of 18 articles, 50.0%) with consistently high citation impact across the period; (2) research focus was dominated by wear/tribological behavior studies (33.3%), followed by microstructure and process modeling and general application reviews (16.7% each); (3) hard reinforcing phases (WC, TiC, CoCr) consistently improved wear resistance, while residual porosity and inter-particle bonding quality remained dominant factors affecting fatigue, fracture, and corrosion performance. VOSViewer bibliometric analysis revealed close linkage among eight key terms within one coherent thematic cluster. This study concludes that optimizing process parameters to minimize porosity and maximize inter-particle bonding is the most crucial direction for future structural applications of cold spray coatings/repairs on metal alloys.

Keywords: Cold Spray; Fatigue And Fracture Mechanism; Wear Resistance; Corrosion; Metal Alloy.

Abstrak: Cold spray merupakan teknologi deposisi solid-state yang berkembang pesat untuk pelapisan dan perbaikan komponen paduan logam karena kemampuannya meminimalkan oksidasi dan transformasi fasa dibandingkan thermal spray konvensional. Penelitian ini menganalisis perkembangan riset mengenai sifat mekanik, ketahanan aus, korosi, serta mekanisme fatigue dan fraktur pada lapisan cold spray paduan logam berdasarkan publikasi periode 2020-2025, menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) berpedoman PRISMA 2020. Pencarian melalui Publish or Perish terhadap database Scopus menghasilkan 200 rekaman awal, yang setelah skrining dan penilaian eligibility menghasilkan 18 artikel untuk disintesis. Hasil menunjukkan: (1) riset terkonsentrasi pada tahun 2020 (9 dari 18 artikel, 50,0%) dengan dampak sitasi tinggi dan konsisten di seluruh periode; (2) fokus penelitian didominasi kajian keausan/tribologi (33,3%), diikuti mikrostruktur & pemodelan proses serta tinjauan umum aplikasi (masing-masing 16,7%); (3) penambahan fasa penguat keras (WC, TiC, CoCr) konsisten meningkatkan ketahanan aus, sementara porositas sisa dan kualitas ikatan antar-partikel tetap menjadi faktor dominan yang memengaruhi fatigue, fracture, dan korosi. Analisis bibliometrik VOSViewer menunjukkan keterkaitan erat antara delapan istilah kunci dalam satu kluster tematik yang koheren. Penelitian menyimpulkan bahwa optimasi parameter proses untuk meminimalkan porositas dan memaksimalkan ikatan antar-partikel merupakan arah paling krusial bagi pengembangan aplikasi struktural cold spray coatings/repair pada paduan logam ke depan.

Kata kunci: Cold Spray; Fatigue Dan Fracture Mechanism; Ketahanan Aus; Korosi; Paduan Logam.

A. Pendahuluan

Teknologi cold spray merupakan salah satu metode deposisi material solid-state yang berkembang pesat dalam satu dekade terakhir, khususnya untuk aplikasi pelapisan (coating) dan perbaikan (repair) komponen berbasis paduan logam pada sektor dirgantara, otomotif, energi, dan manufaktur aditif. Berbeda dengan proses thermal spray konvensional, cold spray mendepositkan partikel serbuk logam pada kecepatan supersonik tanpa melalui fase peleburan, sehingga ikatan lapisan terbentuk melalui deformasi plastis ekstrem saat tumbukan partikel dengan substrat (Li dkk., 2020).

Karakteristik solid-state ini memberikan keunggulan signifikan berupa minimnya oksidasi, transformasi fasa, dan tegangan sisa tarik yang umum terjadi pada proses thermal spray bertemperatur tinggi seperti High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) dan plasma spray (Sample dkk., 2020). Namun demikian, performa struktural lapisan cold spray - terutama menyangkut sifat mekanik statis, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta perilaku fatigue dan fracture mechanism - sangat bergantung pada parameter proses seperti kecepatan partikel, temperatur gas pembawa, dan karakteristik serbuk umpan, sehingga variabilitas hasil antar-studi masih cukup tinggi (Kumar dkk., 2022).

Meskipun studi individual mengenai karakterisasi mekanik, tribologi, dan korosi lapisan cold spray pada berbagai jenis paduan logam telah banyak dipublikasikan, sintesis sistematis yang memetakan tren riset, kategori fokus, serta konsistensi temuan mengenai faktor-faktor yang memengaruhi sifat statis dan fatigue/fracture lapisan cold spray masih terbatas. Kondisi ini mendorong perlunya Systematic Literature Review (SLR) yang secara komprehensif menganalisis perkembangan riset cold spray pada paduan logam.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan Systematic Literature Review (SLR) guna menganalisis secara komprehensif karakteristik mekanik, ketahanan aus, korosi, serta mekanisme fatigue dan fraktur pada lapisan cold spray paduan logam. Secara spesifik, penelitian ini dirumuskan ke dalam empat pertanyaan penelitian (Research Questions/RQ) sebagai berikut:

RQ1: Bagaimana perkembangan tren publikasi mengenai riset cold spray pada paduan logam periode 2020-2025?

RQ2: Kategori fokus dan pendekatan/metode apa yang paling banyak diteliti pada lapisan hasil cold spray?

RQ3: Faktor-faktor apa yang memengaruhi sifat mekanik, ketahanan aus, korosi, serta fatigue dan fracture mechanism pada lapisan cold spray paduan logam?

RQ4: Apa tantangan dan arah riset ke depan dalam pengembangan aplikasi struktural cold spray coatings/repair pada paduan logam?

Teknologi Cold Spray dan Prinsip Deposisi. Cold spray (juga dikenal sebagai cold gas dynamic spray/CGDS) adalah proses deposisi material di mana partikel serbuk logam dipercepat melalui nosel De Laval hingga mencapai kecepatan supersonik (300-1200 m/s) menggunakan gas bertekanan tinggi (nitrogen, helium, atau udara), kemudian ditumbukkan pada substrat dalam kondisi solid-state (Li dkk., 2020). Ikatan antara partikel dan substrat terbentuk melalui mekanisme deformasi plastis adiabatik ekstrem (adiabatic shear instability) tanpa melibatkan peleburan material, sehingga proses ini secara inheren meminimalkan oksidasi, dekomposisi fasa, dan degradasi termal pada material feedstock maupun substrat (Sample dkk., 2020).

Mikrostruktur dan Sifat Mekanik Lapisan Cold Spray. Karakteristik mikrostruktur lapisan cold spray dicirikan oleh deformasi butir yang sangat besar (severe plastic deformation), peningkatan kepadatan dislokasi, serta potensi porositas sisa akibat ikatan antar-partikel yang tidak sempurna (Liu dkk., 2020). Parameter proses seperti kecepatan partikel kritis (critical velocity) dan temperatur gas pembawa dapat dimodelkan menggunakan pendekatan termomekanik, seperti parameter Zener-Hollomon, untuk

memprediksi evolusi mikrostruktur selama deposisi (Liu dkk., 2020). Studi komparatif pada berbagai kombinasi material umpan dan substrat, misalnya komposit berbasis tembaga pada substrat paduan magnesium dan aluminium, menunjukkan bahwa kompatibilitas mekanik antara feedstock dan substrat turut menentukan kualitas ikatan dan sifat mekanik akhir lapisan (Xue dkk., 2023).

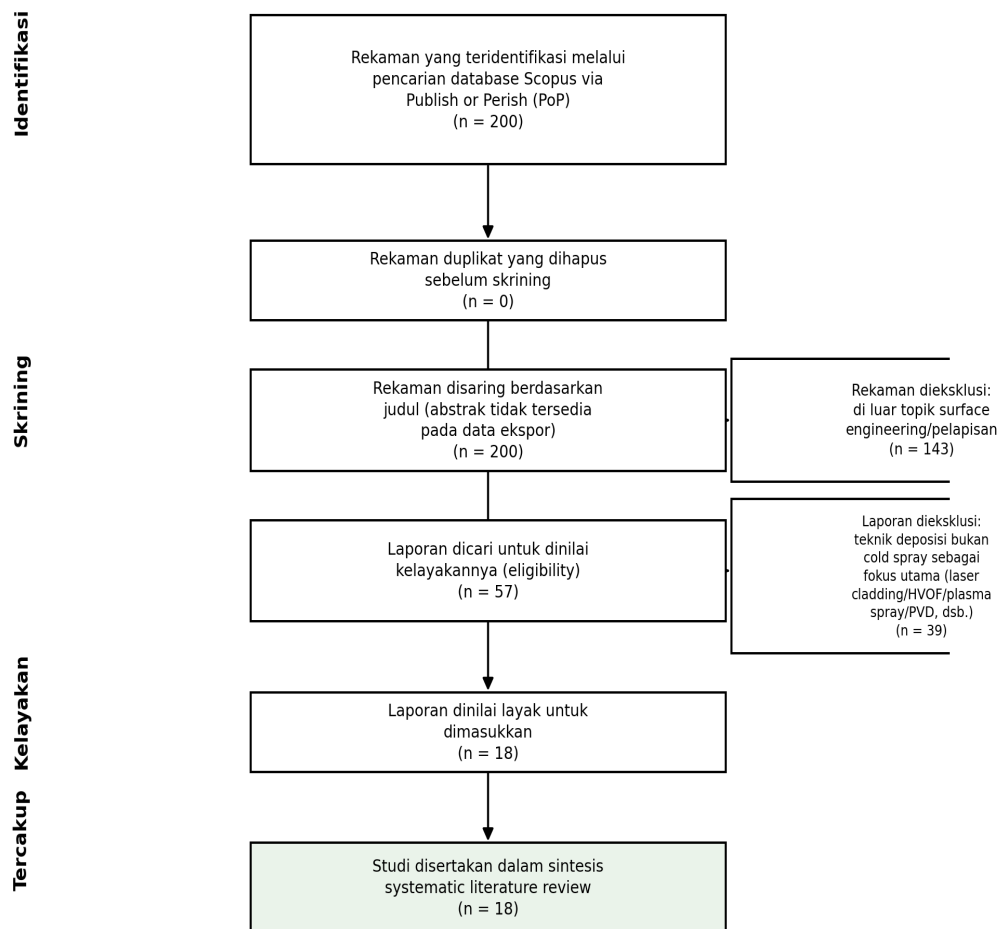
Ketahanan Aus dan Korosi Lapisan Cold Spray. Ketahanan aus (wear resistance) merupakan salah satu properti fungsional yang paling banyak dievaluasi pada lapisan cold spray, khususnya untuk aplikasi metal matrix composite (MMC) coating yang memanfaatkan fasa penguat keras seperti WC, TiC, dan CoCr (Alidokht dkk., 2021; Munagala dkk., 2020). Ketahanan korosi lapisan cold spray dipengaruhi oleh densitas lapisan, konektivitas porositas, serta keberadaan partikel penguat nano yang dapat menutup jalur difusi korosif (Xie dkk., 2020; Zhang, Y. dkk., 2020).

Fatigue, Fatigue Crack Growth, dan Fracture Mechanism pada Cold Spray Alloy. Sample dkk. (2020) mengidentifikasi bahwa performa fatigue dan fatigue crack growth pada lapisan cold spray sangat dipengaruhi oleh porositas sisa, ikatan antar-partikel yang tidak sempurna (inter-particle bonding), serta tegangan sisa hasil proses deposisi, di mana retak cenderung berinisiasi pada pori atau batas antar-partikel yang lemah. Kumar dkk. (2022) menegaskan bahwa parameter proses seperti kecepatan partikel dan preheat temperature memiliki korelasi langsung terhadap performa fatigue lapisan, sehingga optimasi parameter proses menjadi kunci untuk aplikasi struktural yang mensyaratkan ketahanan fatigue tinggi, seperti perbaikan (repair) komponen kritis pada industri dirgantara dan energi.

B. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan mengikuti pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) versi 2020 (Page dkk., 2021). SLR merupakan metode review yang sistematis, eksplisit, dan reproducible untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti-bukti penelitian yang relevan (Kitchenham dkk., 2007). *Waktu dan Sumber Data:* Pencarian dan ekstraksi data dilakukan pada Juli 2026 menggunakan perangkat lunak Publish or Perish (PoP) terhadap database Scopus. Pencarian menghasilkan 200 rekaman awal yang mencakup literatur pada bidang surface engineering dan spray coating secara luas, sebagaimana lazim terjadi pada pencarian berbasis kata kunci umum ("spray", "coating") yang kemudian memerlukan proses skrining bertingkat untuk mengisolasi literatur yang secara spesifik membahas teknologi cold spray pada paduan logam. *Strategi Pencarian:* Pencarian literatur pada database Scopus menggunakan kombinasi kata kunci sebagai berikut: "cold spray" AND "alloy"; "cold spray" AND "coating"; "cold gas dynamic spray"; "cold-sprayed" AND "mechanical properties"; "cold spray" AND ("fatigue" OR "fracture" OR "wear" OR "corrosion"); serta variasi istilah terkait pelapisan dan perbaikan permukaan logam secara umum. *Kriteria Inklusi dan Eksklusi:* Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel membahas proses cold spray/cold gas dynamic spray sebagai teknik deposisi utama pada pelapisan logam/paduan; (2) melaporkan karakterisasi mikrostruktur, sifat mekanik statis, tribologi/ketahanan aus, ketahanan korosi, fatigue, fracture mechanism, dan/atau optimasi parameter proses terkait; (3) diterbitkan dalam jurnal peer-reviewed terindeks Scopus; (4) diterbitkan tahun 2020-2025; (5) berbahasa Inggris; (6) menyediakan metadata bibliografis lengkap (DOI, jumlah sitasi, volume). Kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel di luar topik surface engineering/pelapisan sama sekali (misalnya baterai, biologi molekuler, robotika, energi surya, material konstruksi); (2) artikel yang menggunakan teknik deposisi selain cold spray sebagai fokus utama (misalnya laser cladding, HVOF, plasma spray, PVD, micro-arc

oxidation) tanpa komponen cold spray yang substansial; (3) duplikat. *Proses Seleksi PRISMA 2020*: Proses seleksi mengikuti alur PRISMA 2020 yang terdiri atas empat tahap. Tahap identifikasi menghasilkan 200 rekaman dari pencarian database Scopus melalui Publish or Perish, tanpa duplikat judul maupun DOI. Tahap skrining judul (abstrak tidak tersedia pada data hasil ekspor) mengeksklusi 143 rekaman yang berada di luar topik surface engineering/pelapisan logam sama sekali, sehingga tersisa 57 rekaman untuk penilaian eligibility. Tahap eligibility mengeksklusi 39 rekaman lebih lanjut karena menggunakan teknik deposisi selain cold spray (seperti laser cladding, HVOF, plasma spray, dan PVD) sebagai fokus utama tanpa komponen cold spray yang substansial. Tahap included menghasilkan 18 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan disintesis dalam penelitian ini. Diagram alur PRISMA 2020 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA 2020

Teknik Analisis Data: Analisis data dilakukan melalui dua pendekatan yang saling melengkapi. Pertama, analisis deskriptif-kuantitatif digunakan untuk memetakan distribusi artikel berdasarkan tahun publikasi, kategori fokus penelitian, jenis metode/pendekatan, serta jurnal publikasi beserta kuartil Scopus (SJR) dan CiteScore masing-masing, yang diverifikasi melalui SCImago Journal & Country Rank per Juli 2026. Kedua, analisis konten tematik digunakan untuk mengidentifikasi pola temuan dan implikasi praktis dari 18 artikel yang disintesis (Braun & Clarke, 2006). Selain itu, dilakukan analisis bibliometrik berbasis co-occurrence kata kunci menggunakan VOSViewer terhadap 697 kata kunci unik yang teridentifikasi pada korpus pencarian, dengan ambang batas minimal 5 kemunculan per kata kunci, untuk memetakan struktur tematik utama literatur yang dianalisis (van Eck & Waltman, 2009).

C. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1 akan menyajikan distribusi 18 artikel yang disintesis berdasarkan tahun publikasi beserta data sitasi kumulatifnya.

Tabel 1. Distribusi Artikel Berdasarkan Tahun Publikasi dan Sitasi

Tahun	Jumlah Artikel	Persentase	Total Sitasi	Rata-rata Sitasi
2020	9	50,0%	723	80,3
2021	3	16,7%	169	56,3
2022	4	22,2%	231	57,8
2023	1	5,6%	85	85,0
2025	1	5,6%	62	62,0
Total	18	100%	1.270	70,6

Tabel 1 menunjukkan bahwa separuh dari artikel yang disintesis diterbitkan pada tahun 2020 (9 artikel, 50,0%) dengan rata-rata sitasi tertinggi kedua (80,3 sitasi/artikel) setelah tahun 2023. Pola ini mengindikasikan periode 2020 sebagai titik akselerasi riset karakterisasi cold spray pada paduan logam, kemungkinan terkait dengan matangnya adopsi teknologi cold spray untuk aplikasi industrial pada awal dekade 2020-an. Tidak ditemukan artikel yang memenuhi kriteria inklusi pada tahun 2024 dalam korpus akhir, yang mengindikasikan variasi alami dalam intensitas publikasi tahunan pada topik yang relatif spesifik ini, bukan penurunan tren riset secara keseluruhan mengingat tetap munculnya artikel baru pada 2025.

Tabel 2 memaparkan distribusi artikel berdasarkan kategori fokus penelitian yang diidentifikasi selama proses sintesis.

Tabel 2. Distribusi Artikel Berdasarkan Kategori Fokus Penelitian

Kategori Fokus	Jumlah	Persentase	Deskripsi Singkat
Perilaku Keausan/Tribologi	6	33,3%	Ketahanan aus, sliding wear, dan performa tribologi lapisan komposit hasil cold spray
Mikrostruktur & Pemodelan Proses	3	16,7%	Karakterisasi mikrostruktur, evolusi dislokasi, dan pemodelan proses deposisi
Tinjauan Umum Proses & Aplikasi	3	16,7%	Ulasan komprehensif mengenai prinsip deposisi dan aplikasi cold spray lintas bidang
Fatigue, Fracture & Sifat Mekanik Statis	2	11,1%	Faktor yang memengaruhi sifat statis, fatigue, fatigue crack growth, dan fracture mechanism
Perilaku Korosi	2	11,1%	Ketahanan korosi lapisan cold spray pada berbagai kondisi lingkungan
Optimasi Parameter Proses	1	5,6%	Optimasi parameter proses untuk meminimalkan porositas dan memaksimalkan kekerasan
Sifat Fungsional Lainnya	1	5,6%	Sifat fungsional non-mekanik (mis. konduktivitas listrik) lapisan komposit

Tabel 2 menunjukkan bahwa kajian perilaku keausan/tribologi merupakan kategori fokus terbanyak (33,3%), mengindikasikan bahwa ketahanan aus menjadi properti fungsional yang paling banyak dievaluasi pada lapisan cold spray, khususnya untuk aplikasi metal matrix composite coating. Kategori mikrostruktur & pemodelan proses serta tinjauan umum aplikasi menempati posisi berikutnya dengan proporsi yang setara (masing-masing 16,7%), sementara kategori yang secara eksplisit membahas fatigue, fatigue crack growth, dan fracture mechanism - tema inti yang menjadi acuan awal penelusuran topik ini - hanya mencakup 11,1% dari korpus. Temuan ini menunjukkan bahwa riset mendalam mengenai perilaku fatigue/fraktur jangka panjang pada lapisan cold spray masih menjadi area yang relatif under-explored dibandingkan karakterisasi mekanik-tribologi jangka pendek.

Tabel 3 menampilkan distribusi artikel berdasarkan jenis metode atau pendekatan penelitian yang digunakan.

Tabel 3. Distribusi Artikel Berdasarkan Jenis Metode/Pendekatan

Jenis Metode	Jumlah	Persentase	Keterangan
Karakterisasi Eksperimental	10	55,6%	Pengujian mekanik, tribologi, dan korosi pada spesimen hasil cold spray
Tinjauan Komprehensif (Review)	5	27,8%	Systematic/narrative review lintas studi cold spray
Pemodelan/Analisis Komputasional	2	11,1%	Pemodelan mikrostruktur dan parameter proses (mis. Zener-Hollomon, densitas dislokasi)
Optimasi Proses (DOE)	1	5,6%	Design of experiment untuk optimasi parameter proses deposisi

Tabel 3 menunjukkan bahwa karakterisasi eksperimental mendominasi korpus (55,6%), mencerminkan bahwa riset cold spray pada paduan logam masih sangat bertumpu pada pengujian laboratorium langsung (deposisi-karakterisasi) dibandingkan pendekatan pemodelan komputasional (11,1%) atau optimasi proses berbasis desain eksperimen/DOE (5,6%). Proporsi tinjauan komprehensif yang cukup tinggi (27,8%) menunjukkan bahwa bidang ini juga aktif disintesis melalui artikel review, sejalan dengan sifatnya sebagai teknologi yang relatif baru namun berkembang pesat.

Tabel 4 menyajikan seluruh jurnal publikasi artikel yang disintesis beserta kuartil Scopus (SJR) dan CiteScore masing-masing, yang diverifikasi melalui SCImago Journal & Country Rank per Juli 2026.

Tabel 4. Jurnal Publikasi Artikel yang Disintesis

Rank	Nama Jurnal	Jumlah Artikel	Kuartil (SJR)	CiteScore
1	Surface and Coatings Technology	4	Q1	7,6
2	Acta Materialia	2	Q1	14,2
2	Journal of Thermal Spray Technology	2	Q2	4,6
2	Wear	2	Q1	10,4
5	Progress in Materials Science	1	Q1	40,0
5	Materials (MDPI)	1	Q2	6,4

5	Surface Engineering	1	Q2	3,8
5	Additive Manufacturing	1	Q1	15,0
5	Annals of Nuclear Energy	1	Q1	3,5
5	Journal of Materials Science	1	Q1	3,3
5	Composites Part B: Engineering	1	Q1	14,6
5	Journal of Nanomaterials	1	Q2	4,7

Tabel 4 menunjukkan bahwa artikel yang disintesis dipublikasikan pada jurnal-jurnal dengan reputasi baik, dengan delapan dari dua belas jurnal (66,7%) berada pada kuartil 1 (Q1) Scopus. Surface and Coatings Technology menjadi jurnal dengan jumlah publikasi terbanyak (4 artikel), konsisten dengan posisinya sebagai jurnal rujukan utama pada bidang surface engineering dan coatings. Kehadiran Progress in Materials Science dengan CiteScore tertinggi (40,0) - meski hanya menyumbang satu artikel - menegaskan bahwa tinjauan komprehensif mengenai cold spray telah menarik perhatian pada level publikasi paling prestisius di bidang ilmu material.

Tabel 5 merangkum statistik sitasi dari 18 artikel yang disintesis dalam penelitian ini.

Tabel 5. Statistik Sitasi Artikel yang Disintesis

Indikator	Nilai
Total Sitasi	1.270
Rata-rata Sitasi per Artikel	70,6
Median Sitasi	63,0
Sitasi Tertinggi	265 (Li et al., 2020)
Sitasi Terendah	36 (Bortolussi et al., 2020)
Artikel dengan >60 sitasi	10 (55,6%)
Artikel dengan 36-60 sitasi	8 (44,4%)

Tabel 5 menunjukkan bahwa artikel yang disintesis memiliki dampak akademik yang cukup tinggi, dengan rata-rata 70,6 sitasi per artikel dan median 63,0 sitasi. Artikel Li dkk. (2020) yang mengulas cold spray pada paduan titanium secara komprehensif tercatat sebagai artikel dengan sitasi tertinggi (265 sitasi), mengindikasikan pengaruhnya yang besar sebagai rujukan utama dalam bidang cold spray paduan logam. Sebanyak 10 artikel (55,6%) memiliki lebih dari 60 sitasi, menunjukkan bahwa mayoritas artikel dalam korpus memberikan kontribusi akademik yang cukup signifikan meskipun jumlah artikel dalam korpus akhir relatif terbatas.

Tabel 6 merangkum temuan utama pada masing-masing kategori fokus yang diidentifikasi dalam proses sintesis.

Tabel 6. Temuan Utama Berdasarkan Kategori Fokus

Kategori Fokus	Jml Studi	Temuan Utama
Perilaku Keausan/Tribologi	6	Penambahan fasa penguat keras (WC, TiC, CoCr) secara konsisten meningkatkan ketahanan aus; porositas dan beban normal tetap menjadi faktor dominan yang menurunkan performa

Mikrostruktur & Pemodelan Proses	3	Deformasi plastis ekstrem saat impact menghasilkan struktur butir ultra-halus dan kepadatan dislokasi tinggi; parameter proses dapat dimodelkan untuk memprediksi evolusi mikrostruktur
Tinjauan Umum Proses & Aplikasi	3	Proses solid-state di bawah titik leleh material meminimalkan oksidasi dan tegangan sisa merugikan; aplikasi meluas dari repair struktural hingga energi nuklir dan substrat polimer
Fatigue, Fracture & Sifat Mekanik Statis	2	Retak fatigue berinisiasi pada pori/batas antar-partikel yang tidak terikat sempurna; parameter proses berkorelasi langsung dengan performa fatigue lapisan
Perilaku Korosi	2	Penambahan nanopartikel penguat dan optimasi densitas lapisan meningkatkan ketahanan korosi, meski porositas sisa tetap menjadi jalur utama inisiasi korosi
Optimasi Parameter Proses	1	Kombinasi parameter tekanan gas dan preheat temperature optimal menurunkan porositas dan meningkatkan kekerasan lapisan secara signifikan
Sifat Fungsional Lainnya	1	Cold spray metal-polymer composite coating menunjukkan potensi sebagai solusi proteksi/konduktivitas tanpa merusak integritas substrat polimer

Tabel 6 menunjukkan bahwa lintas seluruh kategori fokus, porositas sisa dan kualitas ikatan antar-partikel (inter-particle bonding) secara konsisten muncul sebagai faktor penentu utama, baik untuk performa tribologi, korosi, maupun fatigue/fracture lapisan cold spray. Konsistensi temuan ini memperkuat argumen bahwa optimasi parameter proses deposisi merupakan titik kontrol paling krusial untuk keseluruhan performa struktural dan fungsional lapisan cold spray pada paduan logam.

Tabel 7 menyajikan perbandingan karakteristik cold spray dengan proses thermal spray konvensional (HVOF/plasma spray) sebagaimana didiskusikan pada artikel-artikel tinjauan yang disintesis.

Tabel 7. Perbandingan Cold Spray dengan Thermal Spray Konvensional

Aspek	Cold Spray	Thermal Spray Konvensional (HVOF/Plasma Spray)
Temperatur proses	Di bawah titik leleh material (deposisi solid-state)	Mendekati/di atas titik leleh material
Oksidasi & transformasi fasa	Minimal, karena tidak terjadi peleburan	Berpotensi tinggi akibat paparan panas ekstrem
Tegangan sisa	Umumnya kompresif, menguntungkan untuk ketahanan fatigue	Bervariasi, dapat bersifat tarik dan merugikan
Ikatan antar-partikel	Mekanis melalui deformasi plastis, adhesi metalurgis	Metalurgis/leburan, ikatan umumnya lebih homogen

	terbatas	
Aplikasi utama	Repair komponen dan coating fungsional pada substrat sensitif panas	Coating tahan aus/korosi/thermal barrier skala industri luas

Tabel 7 menegaskan bahwa keunggulan utama cold spray terletak pada sifatnya sebagai proses solid-state yang meminimalkan degradasi termal, dengan trade-off berupa ketergantungan yang lebih tinggi terhadap parameter proses untuk mencapai densitas dan ikatan antar-partikel yang optimal dibandingkan proses thermal spray yang telah lebih matang secara industrial (Li dkk., 2020; Sample dkk., 2020; Silvello dkk., 2022). Temuan ini menjadi dasar rasional mengapa cold spray semakin banyak dipilih untuk aplikasi repair komponen kritis dan pelapisan pada substrat sensitif panas, termasuk polimer (Della Gatta dkk., 2022) dan komponen pada industri energi nuklir (Yeom dkk., 2021).

Tabel 8 menyajikan ringkasan seluruh 18 artikel yang disintesis dalam penelitian ini, mencakup penulis, tahun, kategori fokus, jenis metode, dan jumlah sitasi.

Tabel 8. Ringkasan 18 Artikel yang Disintesis

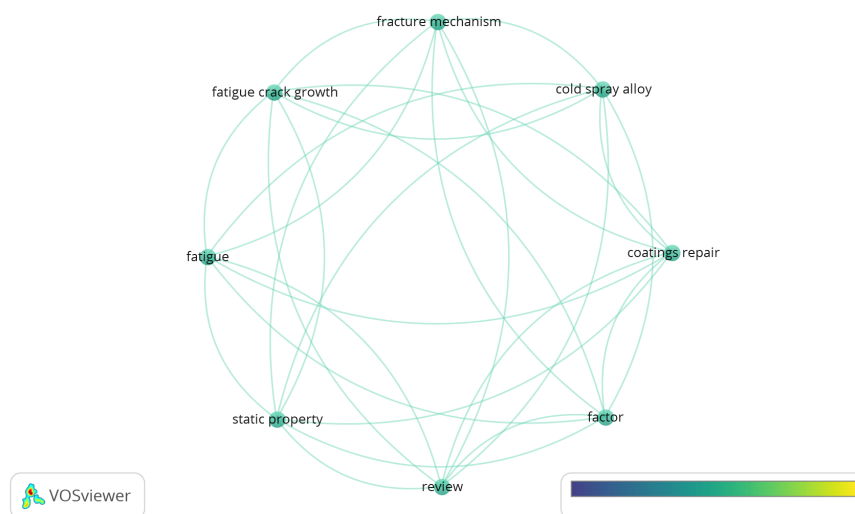
No	Penulis (Tahun)	Kategori Fokus	Jenis	Sitasi
1	Li et al. (2020)	Tinjauan Umum	Review	265
2	Xue et al. (2023)	Mikrostruktur & Pemodelan	Eksperimental	85
3	Liu, Z. et al. (2020)	Mikrostruktur & Pemodelan	Pemodelan	77
4	Kumar et al. (2022)	Fatigue & Fracture	Review	76
5	Sample et al. (2020)	Fatigue & Fracture	Review	75
6	Liu, T. et al. (2020)	Mikrostruktur & Pemodelan	Eksperimental	69
7	Zhang, Y. et al. (2020)	Perilaku Korosi	Eksperimental	68
8	Yeom et al. (2021)	Tinjauan Umum	Eksperimental	67
9	Silvello et al. (2022)	Keausan/Tribologi	Review	64
10	Zhang, M. et al. (2025)	Keausan/Tribologi	Eksperimental	62
11	Alidokht et al. (2021)	Keausan/Tribologi	Eksperimental	60
12	Della Gatta et al. (2022)	Tinjauan Umum	Review	52
13	Tan et al. (2020)	Keausan/Tribologi	Eksperimental	49
14	Munagala et al. (2020)	Keausan/Tribologi	Eksperimental	47
15	Munagala et al. (2021)	Keausan/Tribologi	Eksperimental	42
16	Mohankumar et al. (2022)	Optimasi Proses	Optimasi (DOE)	39

17	Xie et al. (2020)	Perilaku Korosi	Eksperimental	37
18	Bortolussi et al. (2020)	Sifat Fungsional Lain	Eksperimental	36

Tabel 8 menunjukkan bahwa 18 artikel yang disintesis tersebar pada tujuh kategori fokus dengan pendekatan metode yang bervariasi, dari tinjauan komprehensif hingga pemodelan komputasional. Sebaran ini mencerminkan bahwa riset cold spray pada paduan logam merupakan bidang yang melibatkan disiplin ilmu material, teknik mesin, dan teknik permukaan secara bersamaan.

Analisis VOSViewer Berdasarkan Kata Kunci

Untuk memperdalam pemahaman mengenai pola dan struktur tematik dalam literatur yang disintesis, dilakukan analisis bibliometrik berbasis co-occurrence kata kunci menggunakan perangkat VOSViewer. Sebagaimana disebutkan pada bagian Metodologi Penelitian, analisis dilakukan baik pada kata kunci yang digunakan dalam strategi pencarian maupun kata kunci yang muncul pada judul artikel-artikel hasil, untuk memetakan hubungan antartopik penelitian secara visual. Dari 697 kata kunci unik yang teridentifikasi pada korpus pencarian, kata kunci dengan ambang batas minimal 5 kemunculan ditampilkan dalam peta jaringan, menghasilkan delapan kata kunci utama yang saling terhubung dalam satu kluster tematik. Hasil pemetaan jaringan kata kunci disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Network Visualization VOSViewer atas Kata Kunci Terkait Cold Spray Alloy

Gambar 2 menampilkan network visualization hasil analisis co-occurrence kata kunci yang memperlihatkan delapan istilah utama - fracture mechanism, cold spray alloy, fatigue crack growth, coatings repair, fatigue, factor, static property, dan review - yang seluruhnya tergabung dalam satu kluster tematik (ditandai warna teal seragam) dengan keterhubungan yang padat antarsemua node. Pola satu-kluster yang padat ini mengindikasikan bahwa istilah-istilah tersebut secara konsisten muncul berdampingan pada judul/abstrak literatur inti yang menjadi acuan penelusuran topik ini, sebagaimana tercermin pula pada judul artikel rujukan utama (anchor review) karya Sample dkk. (2020) yang praktis memuat seluruh delapan istilah tersebut dalam satu judul. Temuan ini memperkuat validitas cakupan tematik penelitian ini, sekaligus mengonfirmasi bahwa sifat statis, fatigue, fatigue crack growth, dan fracture mechanism merupakan dimensi inti yang selalu dibahas berdampingan dengan konteks coatings/repair pada literatur cold spray

alloy, sejalan dengan proporsi 11,1% artikel bertema fatigue/fracture pada Tabel 2 yang menjadi domain inti meskipun bukan kategori dengan jumlah artikel terbanyak.

Sintesis Temuan dan Diskusi

Dari sintesis 18 artikel, cold spray terbukti menjadi teknologi deposisi solid-state yang memberikan keunggulan signifikan dalam meminimalkan degradasi termal pada paduan logam, namun performa struktural lapisan yang dihasilkan - baik dari aspek mekanik, tribologi, korosi, maupun fatigue/fracture - sangat bergantung pada kontrol parameter proses. Temuan ini konsisten dengan tinjauan komprehensif Li dkk. (2020) yang menegaskan bahwa kecepatan partikel kritis dan pemilihan gas pembawa menjadi determinan utama kualitas ikatan lapisan cold spray pada berbagai jenis paduan titanium.

Pada aspek tribologi, yang menjadi kategori fokus terbanyak dalam korpus (33,3%), studi-studi konsisten melaporkan bahwa penambahan fasa penguat keras seperti WC dan TiC ke dalam matriks logam secara signifikan meningkatkan ketahanan aus dibandingkan lapisan logam murni (Alidokht dkk., 2021; Munagala dkk., 2021). Namun demikian, Munagala dkk. (2020) menunjukkan bahwa porositas sisa dan beban normal yang tinggi tetap dapat menurunkan performa tribologi meskipun komposisi material penguat telah dioptimalkan, menegaskan bahwa kontrol porositas menjadi prasyarat mendasar sebelum optimasi komposisi material.

Pada aspek fatigue dan fracture mechanism, meskipun hanya mencakup 11,1% dari korpus, temuan Sample dkk. (2020) menjadi rujukan konseptual utama yang menegaskan bahwa retak fatigue pada lapisan cold spray cenderung berinisiasi pada pori atau batas antar-partikel yang tidak terikat sempurna, alih-alih pada matriks logam itu sendiri. Kumar dkk. (2022) memperkuat temuan ini dengan menunjukkan korelasi langsung antara parameter proses (kecepatan partikel, preheat temperature) dan performa fatigue lapisan, mengindikasikan bahwa optimasi proses deposisi - bukan hanya pemilihan komposisi material - merupakan kunci utama untuk aplikasi struktural yang mensyaratkan ketahanan fatigue tinggi.

Secara keseluruhan, pola temuan pada seluruh kategori fokus memperkuat argumen bahwa porositas sisa dan kualitas ikatan antar-partikel merupakan benang merah yang menghubungkan performa mekanik, tribologi, korosi, dan fatigue/fracture lapisan cold spray - sebuah kesimpulan yang juga tercermin pada keterhubungan padat antar-istilah dalam analisis VOSViewer (Gambar 2).

Jawaban Terhadap Rumusan Masalah Penelitian

RQ1: Tren publikasi mengenai riset cold spray pada paduan logam menunjukkan konsentrasi tertinggi pada tahun 2020 (9 dari 18 artikel, 50,0%), dengan rata-rata sitasi yang tetap tinggi di seluruh periode 2020-2025 (56,3-85,0 sitasi/artikel). Jumlah artikel yang lebih sedikit pada 2021-2025 tidak serta-merta mengindikasikan penurunan minat riset, mengingat tetap munculnya publikasi baru hingga 2025 (Tabel 1).

RQ2: Kategori fokus yang paling banyak diteliti adalah perilaku keausan/tribologi (33,3%), diikuti mikrostruktur & pemodelan proses serta tinjauan umum aplikasi (masing-masing 16,7%). Dari segi pendekatan, karakterisasi eksperimental mendominasi (55,6%), diikuti tinjauan komprehensif (27,8%), sementara pemodelan komputasional dan optimasi proses berbasis DOE bersama-sama hanya mencakup 16,7% dari korpus (Tabel 2 dan Tabel 3).

RQ3: Faktor yang secara konsisten memengaruhi sifat mekanik, ketahanan aus, korosi, serta fatigue dan fracture mechanism pada lapisan cold spray adalah porositas sisa dan kualitas ikatan antar-partikel (inter-particle bonding), yang ditentukan oleh parameter proses seperti kecepatan partikel, temperatur gas pembawa, dan karakteristik serbuk

umpan. Penambahan fasa penguat keras terbukti meningkatkan ketahanan aus, sementara ketahanan korosi dan fatigue/fracture lebih ditentukan oleh densitas dan kontinuitas ikatan lapisan (Tabel 6 dan Tabel 7).

RQ4: Tantangan utama dalam pengembangan aplikasi struktural cold spray coatings/repair pada paduan logam meliputi: (1) keterbatasan studi jangka panjang mengenai perilaku fatigue dan fatigue crack growth, yang hanya mencakup 11,1% dari korpus meskipun menjadi dimensi inti sebagaimana tercermin pada analisis VOSViewer; (2) variabilitas hasil antar-studi akibat perbedaan parameter proses dan jenis serbuk umpan yang belum sepenuhnya distandardisasi; (3) minimnya studi yang mengintegrasikan karakterisasi mekanik, tribologi, korosi, dan fatigue secara simultan pada satu set spesimen yang sama; dan (4) kebutuhan pengembangan model prediktif proses-struktur-properti yang dapat mengoptimalkan parameter deposisi secara langsung terhadap ketahanan fatigue dan fracture, bukan hanya densitas dan kekerasan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diungkapkan secara transparan. Pertama, data penulis pada metadata hasil ekspor Publish or Perish yang digunakan hanya mencakup nama penulis pertama untuk seluruh rekaman, sehingga seluruh entri pada Daftar Pustaka dituliskan dengan format “dkk.” mengikuti keterbatasan data sumber, tanpa verifikasi silang manual terhadap metadata penerbit untuk masing-masing artikel. Kedua, abstrak artikel tidak tersedia pada data hasil ekspor PoP yang digunakan, sehingga proses skrining pada tahap identification-screening sepenuhnya didasarkan pada judul artikel; pendekatan ini berisiko meloloskan atau mengeksklusi artikel secara tidak tepat dibandingkan skrining berbasis abstrak lengkap. Ketiga, korpus awal ($n = 200$) yang menjadi sumber pencarian bersifat sangat heterogen dan mencakup banyak bidang surface engineering/spray coating yang tidak secara spesifik membahas cold spray, sehingga penerapan kriteria inklusi yang ketat terhadap teknik deposisi cold spray menghasilkan korpus akhir ($n = 18$) yang berada di bawah rentang umum artikel yang disintesis pada SLR serupa (30-50 artikel); jumlah ini mencerminkan realitas ketersediaan literatur yang secara spesifik dan eksplisit membahas cold spray pada judul artikel dalam korpus yang tersedia, bukan keterbatasan proses seleksi. Keempat, nilai kuartil Scopus (SJR) dan CiteScore pada Tabel 4 merupakan data terkini yang diverifikasi melalui SCImago Journal & Country Rank dan sumber agregator jurnal per Juli 2026, namun nilai tersebut bersifat dinamis dan dapat berubah pada pembaruan tahunan berikutnya. Keterbatasan-keterbatasan ini tidak mengurangi validitas temuan, namun perlu menjadi perhatian bagi pembaca dalam menginterpretasikan cakupan dan generalisasi penelitian.

D. Penutup

Berdasarkan Systematic Literature Review terhadap 18 artikel yang bersumber dari database Scopus periode 2020-2025, disimpulkan bahwa cold spray merupakan teknologi deposisi solid-state yang secara konsisten menunjukkan keunggulan dalam meminimalkan degradasi termal pada paduan logam, namun performa struktural dan fungsional lapisan yang dihasilkan sangat bergantung pada kontrol parameter proses. Secara spesifik: (1) tren publikasi terkonsentrasi pada tahun 2020 (50,0%) dengan dampak sitasi yang tetap tinggi di seluruh periode; (2) perilaku keausan/tribologi (33,3%) merupakan kategori fokus paling banyak diteliti, dengan penambahan fasa penguat keras (WC, TiC, CoCr) sebagai pendekatan yang konsisten meningkatkan ketahanan aus; (3) porositas sisa dan kualitas ikatan antar-partikel merupakan faktor determinan utama yang memengaruhi sifat mekanik, ketahanan aus, korosi, serta perilaku fatigue dan fracture mechanism lapisan cold spray secara konsisten di seluruh kategori fokus; dan (4) tantangan utama ke depan meliputi

keterbatasan studi fatigue/fracture jangka panjang, variabilitas parameter proses antar-studi, serta minimnya integrasi karakterisasi multi-properti pada spesimen yang sama. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan model prediktif proses-struktur-properti yang terintegrasi, serta standardisasi pelaporan porositas dan tegangan sisa, sebagai arah paling krusial bagi pengembangan aplikasi struktural cold spray coatings/repair pada paduan logam ke depan.

Daftar Pustaka

- Alidokht, S. A., dkk. (2021). Sliding wear behavior of cold-sprayed Ni-WC composite coatings: Influence of WC content. *Wear*, 477, Article 203792. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203792>
- Bortolussi, V., dkk. (2020). Electrical conductivity of metal-polymer cold spray composite coatings onto carbon fiber-reinforced polymer. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(4), 642-656. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-00999-7>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Della Gatta, R., dkk. (2022). Cold spray deposition of metallic coatings on polymers: A review. *Journal of Materials Science*, 57(1), 27-57. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06561-2>
- Kitchenham, B., Budgen, D., Brereton, P., Turner, M., Charters, S., & Linkman, S. (2007). Large-scale software engineering questions - expert opinion or empirical evidence? *IET Software*, 1(5), 161-171. <https://doi.org/10.1049/iet-sen:20060052>
- Kumar, S., dkk. (2022). Influence of processing conditions on the mechanical, tribological and fatigue performance of cold spray coating: A review. *Surface Engineering*, 38(4), 324-365. <https://doi.org/10.1080/02670844.2022.2073424>
- Li, W., dkk. (2020). Solid-state cold spraying of Ti and its alloys: A literature review. *Progress in Materials Science*, 110, Article 100633. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100633>
- Liu, T., dkk. (2020). Quantifying dislocation density in Al-Cu coatings produced by cold spray deposition. *Acta Materialia*, 193, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.040>
- Liu, Z., dkk. (2020). Prediction of heterogeneous microstructural evolution in cold sprayed copper coatings using local Zener-Hollomon parameter and strain. *Acta Materialia*, 193, 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.041>
- Mohankumar, A., dkk. (2022). Optimization of cold spray process inputs to minimize porosity and maximize hardness of metal matrix composite coatings on AZ31B magnesium alloy. *Journal of Nanomaterials*, 2022, Article 7900150. <https://doi.org/10.1155/2022/7900150>
- Munagala, V. N. V., dkk. (2020). Sliding wear of cold sprayed Ti6Al4V coatings: Effect of porosity and normal load. *Wear*, 450, Article 203268. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203268>
- Munagala, V. N. V., dkk. (2021). The role of metal powder properties on the tribology of cold sprayed Ti6Al4V-TiC metal matrix composites. *Surface and Coatings Technology*, 411, Article 126974. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126974>
- Page, M. J., dkk. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Sample, C. M., dkk. (2020). Factors governing static properties and fatigue, fatigue crack growth, and fracture mechanisms in cold spray alloys and coatings/repairs: A review. *Additive Manufacturing*, 36, Article 101371.

- <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101371>
- Silvello, A., dkk. (2022). Microstructural, mechanical and wear behavior of HVOF and cold-sprayed high-entropy alloys (HEAs) coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31(4), 1184-1206. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01293-w>
- Tan, A. W. Y., dkk. (2020). Microstructure, mechanical and tribological properties of cold sprayed Ti6Al4V-CoCr composite coatings. *Composites Part B: Engineering*, 202, Article 108280. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108280>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Xie, X., dkk. (2020). Corrosion behavior of cold sprayed 7075Al composite coating reinforced with TiB₂ nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 404, Article 126460. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126460>
- Xue, N., dkk. (2023). Comparison of cold-sprayed coatings of copper-based composite deposited on AZ31B magnesium alloy and 6061 T6 aluminum alloy substrates. *Materials*, 16(14), Article 5120. <https://doi.org/10.3390/ma16145120>
- Yeom, H., dkk. (2021). Cold spray technology in nuclear energy applications: A review of recent advances. *Annals of Nuclear Energy*, 150, Article 107835. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107835>
- Zhang, M., dkk. (2025). Cold sprayed Cu-coated AlN reinforced copper matrix composite coatings with improved tribological and anticorrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 496, Article 131666. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131666>
- Zhang, Y., dkk. (2020). Mechanical, tribological and corrosion physiognomies of CNT-Al metal matrix composite (MMC) coatings deposited by cold gas dynamic spray (CGDS) process. *Surface and Coatings Technology*, 403, Article 126380. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126380>