



Review article

Tinjauan Sistematis Al-based Low-Cost High Entropy Alloy Coatings untuk Aplikasi Wear-Resistant: Desain Material, Pembentukan Fasa, dan Kekerasan

Kholqillah Ardhian Iman^{1,2*}, Ramzul Irham Riza¹, Fadhli Muhammad³

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Sukoharjo, Central Java, 57169, **Indonesia**

² Institute of Science and Engineering, Division of Mechanical Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, **Japan**

³ Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institute Technology of Bandung, Bandung 40132, **Indonesia**

*Corresponding author: e-mail: kai252@ums.ac.id

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 28 December 2025

Revised: 14 January 2026

Accepted: 22 January 2026

Available online: 23 January 2026

Keywords: high entropy alloy (HEA), aluminum-based HEA, wear-resistant coatings, low-cost materials, phase formation

ABSTRACT

The development of wear-resistant coatings with high performance and reduced cost has become an important requirement across various industrial sectors, including manufacturing, mining, and energy. High entropy alloys (HEAs) have attracted considerable attention as coating materials due to their ability to form simple phases and to exhibit a favorable combination of mechanical and tribological properties. However, many early-generation HEA systems still rely heavily on expensive elements such as Co and Ni, which limits their practical applicability. Consequently, recent research has increasingly focused on the development of Al-based low-cost HEA coatings as a more economical alternative. This review paper presents a systematic overview of recent progress in Al-based HEA coatings for wear-resistant applications, with emphasis on low-cost material design strategies, phase formation, microstructural characteristics, and the influence of coating deposition techniques. Various Al-based HEA systems have been reported to form body-centered cubic (BCC), B2 ordered, or combined BCC + face-centered cubic (FCC) phases, which directly affect hardness and wear resistance. A dominant BCC phase generally results in high hardness, whereas the presence of an FCC phase enhances ductility and wear stability.

In addition to compositional design, deposition methods such as laser cladding, high velocity air fuel (HVOF), cold spray, and detonation spraying play a critical role in controlling the microstructure and final performance of the coatings. Moreover, the HEA–ceramic composite approach has emerged as an effective strategy to improve wear resistance without significantly increasing material costs. Overall, this review demonstrates that Al-based low-cost HEA coatings offer great potential as economical and high-performance wear-resistant coating solutions. Future challenges include optimizing the balance between hardness and ductility, standardizing wear testing methodologies, and evaluating the feasibility of large-scale industrial applications.

ABSTRAK

Kata Kunci: *high entropy Alloy (HEA)*, HEA berbasis aluminium, pelapisan tahan aus, material berbiaya rendah, pembentukan fasa

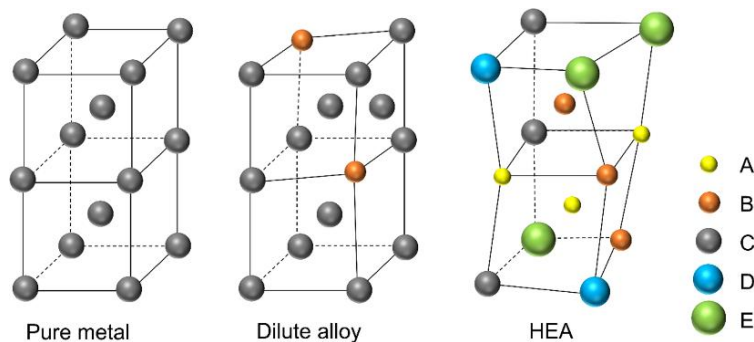
Pengembangan *wear-resistant coatings* yang memiliki performa tinggi dan biaya yang lebih rendah menjadi kebutuhan penting dalam berbagai sektor industri, termasuk manufaktur, pertambangan, dan energi. *High entropy alloys (HEAs)* telah menarik perhatian luas sebagai material pelapis karena kemampuannya membentuk fasa sederhana serta menunjukkan kombinasi sifat mekanik dan tribologi yang unggul. Namun, banyak sistem *HEA* generasi awal masih bergantung pada unsur mahal seperti *Co* dan *Ni*, sehingga membatasi penerapan praktisnya. Oleh karena itu, penelitian terkini berfokus pada pengembangan *Al-based low-cost HEA coatings* sebagai alternatif yang lebih ekonomis. *Paper review* ini menyajikan tinjauan sistematis terhadap perkembangan *Al-based HEA coatings* untuk aplikasi *wear-resistant*, dengan penekanan pada strategi desain material berbiaya rendah, pembentukan *phase*, karakteristik *microstructure*, serta pengaruh teknik deposisi *coating*. Berbagai sistem *Al-based HEA* dilaporkan mampu membentuk *body-centered cubic (BCC)*, *B2 ordered*, atau kombinasi *BCC + face-centered cubic (FCC)*, yang secara langsung memengaruhi *hardness* dan ketahanan aus. Dominasi *BCC phase* umumnya menghasilkan *hardness* tinggi, sementara keberadaan *FCC phase* meningkatkan keuletan dan stabilitas aus. Selain desain komposisi, metode deposisi seperti *laser cladding*, *high velocity air fuel (HVOF)*, *cold spray*, dan *detonation spraying* terbukti berperan penting dalam mengontrol *microstructure* dan performa akhir *coating*. Pendekatan *HEA–ceramic composite* juga muncul sebagai strategi efektif untuk meningkatkan *wear resistance* tanpa meningkatkan biaya material secara signifikan. Secara keseluruhan, kajian ini menunjukkan bahwa *Al-based low-cost HEA coatings* memiliki potensi besar sebagai solusi *wear-resistant coatings* yang ekonomis dan berkinerja tinggi. Tantangan ke depan mencakup optimasi keseimbangan antara kekerasan dan keuletan, standarisasi pengujian aus, serta evaluasi kelayakan pada skala industri.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan *coating* tahan aus (*wear-resistant coating*) terus meningkat seiring dengan berkembangnya industri manufaktur, pertambangan, energi, dan transportasi. Pada kondisi operasi yang melibatkan gesekan berulang, beban mekanik tinggi, dan lingkungan abrasif, kegagalan permukaan sering kali menjadi faktor pembatas umur pakai komponen. Selama ini, *coating* berbasis paduan Ni, Co, maupun sistem WC–Co banyak digunakan untuk meningkatkan ketahanan aus. Namun, penggunaan elemen-elemen tersebut berdampak pada biaya material yang tinggi serta ketergantungan pada unsur kritis, sehingga mendorong pencarian alternatif material yang lebih ekonomis.

Dalam beberapa tahun terakhir, High Entropy Alloys (HEAs) telah menarik perhatian luas sebagai kandidat material pelapis karena menunjukkan kombinasi sifat mekanik dan tribologi yang unggul, termasuk kekerasan tinggi, ketahanan aus yang baik, serta stabilitas mikrostruktur pada berbagai kondisi operasi [1]. Konsep HEA yang mengandalkan beberapa unsur utama dengan fraksi atom relatif seimbang memungkinkan pembentukan fasa sederhana seperti FCC, BCC, atau kombinasi keduanya, yang berkontribusi terhadap peningkatan performa mekanik dan ketahanan aus.

High Entropy Alloys merupakan kelas paduan logam yang dirancang menggunakan beberapa unsur utama dengan fraksi atom yang relatif seimbang, berbeda dari paduan konvensional yang umumnya didominasi oleh satu unsur utama. Pendekatan ini menghasilkan nilai *configurational entropy* yang tinggi, sehingga cenderung menstabilkan pembentukan fasa sederhana seperti FCC dan BCC, menekan pembentukan fasa intermetalik kompleks, serta penguatan melalui *lattice distortion*. Skema konsep dasar desain HEA ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema *lattice distortion* pada logam murni berstruktur BCC, paduan *dilute alloy*, dan HEA. Huruf A–E merepresentasikan berbagai jenis unsur penyusun secara umum [2].

Meskipun demikian, banyak sistem HEA awal masih mengandung unsur mahal seperti Co dan Ni dalam jumlah signifikan, sehingga membatasi penerapannya secara luas di industri. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian terkini mulai berfokus pada pengembangan HEA berbiaya rendah (*low-cost HEA*) dengan menggantikan atau mengurangi unsur mahal menggunakan elemen yang lebih murah dan melimpah. Dalam konteks ini, aluminium (Al) menjadi salah satu unsur yang paling banyak dieksplorasi karena harganya relatif rendah, densitasnya kecil, serta kemampuannya dalam menstabilkan fasa BCC atau B2 yang berkorelasi dengan peningkatan kekerasan dan ketahanan aus [3].

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa Al-based HEA coatings memiliki potensi besar untuk aplikasi tahan aus. Sistem seperti FeCrMnAlCu [4], AlCrFeNiV [5], AlCrFeNiCu [6], serta

FeCoNiCuAlSi_x [7] dilaporkan mampu mencapai kekerasan menengah hingga sangat tinggi, bergantung pada komposisi dan mikrostruktur yang terbentuk. Secara umum, peningkatan kandungan Al cenderung mendorong transformasi fasa menuju struktur BCC atau BCC+B2, yang menghasilkan peningkatan kekerasan lapisan, meskipun pada beberapa kasus dapat meningkatkan kecenderungan kerapuhan [5, 8].

Selain desain komposisi, metode deposisi coating juga berperan penting dalam menentukan mikrostruktur dan performa akhir HEA. Berbagai teknik seperti laser cladding [9-11], cold spray yang dikombinasikan dengan remelting [4, 12], serta thermal spray berkecepatan tinggi seperti HVAF dan detonation spraying [8, 13] telah dilaporkan mampu menghasilkan lapisan HEA yang padat dengan ikatan yang baik terhadap substrat. Kombinasi antara komposisi HEA berbasis Al dan metode deposisi yang sesuai terbukti meningkatkan ketahanan aus secara signifikan dibandingkan material substrat konvensional.

Meskipun jumlah studi mengenai Al-based low-cost HEA coatings terus bertambah, masih terdapat variasi yang cukup besar dalam definisi “*low-cost*”, pemilihan komposisi, serta pendekatan evaluasi performa. Beberapa penelitian menekankan pengurangan unsur mahal melalui sistem Co-free atau Ni-reduced [5-6], sementara penelitian lain menekankan efisiensi biaya melalui penggunaan HEA sebagai coating, pemanfaatan powder elemental, atau penguatan komposit dengan partikel keramik murah seperti TiC dan Al₂O₃ [11, 14, 15]. Hal ini menunjukkan perlunya sintesis dan evaluasi kritis terhadap hasil-hasil penelitian yang telah ada.

Oleh karena itu, *paper review* ini bertujuan untuk meninjau secara sistematis perkembangan Al-based low-cost HEA coatings untuk aplikasi tahan aus, dengan fokus pada hubungan antara komposisi paduan, fasa yang terbentuk, dan nilai kekerasan. Dengan mengkaji literatur terkini, review ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi, keterbatasan, serta arah pengembangan HEA berbasis aluminium sebagai solusi coating tahan aus yang lebih ekonomis dan aplikatif.

Dalam kajian ini, pendekatan *systematic review* dilakukan melalui seleksi literatur secara terarah untuk mengidentifikasi penelitian yang relevan dengan topik *Al-based low-cost high entropy alloy coatings* untuk aplikasi *wear-resistant*. Literatur dipilih dari jurnal internasional bereputasi yang terindeks *Scopus* dan tersedia secara *open access*, dengan rentang tahun publikasi utama antara 2020 hingga 2025. Kriteria pemilihan meliputi penggunaan HEA berbasis aluminium, fokus pada aplikasi *coating* tahan aus, serta pelaporan karakteristik fasa, mikrostruktur, dan sifat mekanik seperti kekerasan dan ketahanan aus. Artikel yang tidak relevan dengan aplikasi *coating* atau menggunakan unsur paduan berbiaya tinggi sebagai komponen utama dikecualikan dari pembahasan. Pendekatan ini memungkinkan sintesis literatur yang terfokus dan komparatif untuk mengevaluasi perkembangan dan tantangan *Al-based low-cost HEA coatings*.

2. PEMBAHASAN

2.1. Desain Material dan Strategi Biaya Rendah

Pengembangan HEA berbiaya rendah untuk aplikasi coating tahan aus didorong oleh keterbatasan sistem HEA generasi awal yang umumnya mengandalkan unsur mahal seperti Co dan Ni. Dalam konteks aplikasi industri, biaya material menjadi faktor krusial, terutama ketika coating diaplikasikan pada komponen berskala besar atau dengan volume produksi tinggi. Oleh karena itu, penelitian terkini lebih menekankan pada strategi desain material yang mampu mempertahankan performa mekanik dan tribologi HEA sekaligus menurunkan biaya bahan baku.

Salah satu pendekatan utama adalah penggunaan aluminium (Al) sebagai unsur kunci dalam

desain HEA berbiaya rendah. Aluminium memiliki harga relatif murah, densitas rendah, serta kecenderungan untuk menstabilkan fasa BCC atau B2, yang umumnya berkorelasi dengan peningkatan kekerasan dan ketahanan aus. Studi oleh Ma et al. [4] menunjukkan bahwa sistem FeCrMnAlCu mampu mencapai kekerasan yang kompetitif dengan HEA konvensional, meskipun hanya menggunakan unsur-unsur yang relatif murah dan melimpah. Temuan serupa juga dilaporkan pada sistem AlCrFeNiV, di mana eliminasi Co menghasilkan paduan dengan kekerasan sangat tinggi akibat terbentuknya fasa BCC ganda [5].

Strategi biaya rendah lainnya adalah pengurangan atau eliminasi unsur mahal melalui desain sistem Co-free atau Ni-reduced. Vignesh et al., [6] membandingkan sistem AlCrFeNiCu dan AlCrFeNiCo, dan menunjukkan bahwa paduan bebas Co menawarkan keuntungan biaya yang signifikan, meskipun dengan kompromi tertentu pada kekerasan. Dalam beberapa kasus, penurunan kekerasan ini dapat diimbangi oleh peningkatan keuletan, yang justru memberikan performa ketahanan aus yang sebanding atau lebih baik pada kondisi beban tertentu.

Selain modifikasi komposisi, pendekatan HEA sebagai *coating*, bukan *material bulk*, juga merupakan strategi penting dalam menekan biaya. Dengan mengaplikasikan HEA hanya pada permukaan yang mengalami keausan, konsumsi material HEA dapat dikurangi secara signifikan tanpa mengorbankan performa fungsional. Pendekatan ini banyak diterapkan melalui teknik *laser cladding*, *thermal spraying*, dan *cold spray* [8, 10, 13].

Lebih lanjut, beberapa studi menggabungkan HEA dengan partikel penguat berbiaya rendah seperti TiC, WC, atau Al₂O₃ untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus tanpa perlu menambahkan unsur logam mahal. Guo et al., [11] melaporkan bahwa penambahan TiC pada sistem AlCrCuFeNi secara signifikan meningkatkan kekerasan dan menurunkan laju keausan coating, sementara Zhang et al., [15] menunjukkan bahwa komposit HEA–Al₂O₃ efektif dalam meningkatkan performa tribologi pada substrat magnesium dengan pendekatan yang relatif ekonomis.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa desain HEA berbiaya rendah tidak bergantung pada satu strategi tunggal, melainkan merupakan kombinasi dari pemilihan unsur murah, optimalisasi komposisi, pendekatan coating, serta penguatan komposit. Pendekatan multidimensional ini memungkinkan Al-based HEA coatings untuk mencapai keseimbangan antara biaya, kekerasan, dan ketahanan aus, sehingga meningkatkan potensi penerapannya dalam skala industri. Kesimpulan strategi desain material berbiaya rendah pada Al-based HEA coatings dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Strategi desain material berbiaya rendah pada Al-based HEA coatings.

Strategi biaya rendah	Sistem HEA	Elemen kunci	Alasan penurunan biaya	Referensi
Substitusi unsur mahal	FeCrMnAlCu	Al, Fe, Mn	Tanpa Co/Ni, semua unsur murah	[4]
Sistem Co-free	AlCrFeNiV	Al, V	Eliminasi Co, BCC strengthening	[5]
Penggantian Co dengan Cu	AlCrFeNiCu	Cu	Cu lebih murah dari Co, meningkatkan keuletan	[6]
HEA sebagai coating	AlCoCrFeNi (coating)	Al	Mengurangi volume HEA yang digunakan	[10]
Komposit HEA–keramik	AlCrCuFeNi + TiC	TiC	Penguatan murah tanpa alloying mahal	[11]

2.2. Pembentukan Fasa dan Karakteristik Mikrostruktur

Pembentukan *phase* dan karakteristik *microstructure* merupakan faktor fundamental yang menentukan performa mekanik dan ketahanan aus pada *Al-based low-cost high entropy alloy (HEA) coatings*. Salah satu keunggulan utama HEA adalah kecenderungannya membentuk *simple phases* seperti *face-centered cubic (FCC)*, *body-centered cubic (BCC)*, atau kombinasi keduanya, meskipun tersusun dari beberapa unsur utama. Pada sistem HEA berbasis aluminium, pembentukan *phase* sangat dipengaruhi oleh kandungan aluminium, jenis unsur tambahan, serta kondisi termal selama proses deposisi *coating*.

Secara umum, peningkatan kandungan aluminium dalam HEA cenderung menstabilkan BCC atau B2 *ordered phase*. Hal ini berkaitan dengan perbedaan ukuran atom dan kecenderungan Al membentuk ikatan teratur dengan unsur transisi tertentu, seperti Ni atau Fe, yang menghasilkan struktur B2. Feng et al., [5] melaporkan bahwa sistem AlCrFeNiV membentuk dua BCC *phases* yang berbeda (*dual BCC*), yang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kekerasan. Temuan ini menunjukkan bahwa dominasi BCC *phase* pada *Al-based HEA* merupakan mekanisme utama dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.

Namun demikian, tidak semua sistem *Al-based HEA* menghasilkan *single BCC phase*. Pada beberapa komposisi yang mengandung unsur seperti Cu atau Mn, terbentuk struktur BCC + FCC atau bahkan FCC-dominant. Vignesh et al., [6] menunjukkan bahwa FeCrMnAlCu membentuk BCC + FCC *microstructure*, di mana FCC *phase* yang kaya Cu cenderung terdistribusi pada daerah *interdendritic*. Kehadiran FCC *phase* ini dapat meningkatkan keuletan *coating*, meskipun biasanya diikuti oleh penurunan kekerasan dibandingkan sistem dengan BCC-dominant *phase*.

Unsur tambahan seperti Cu, Mn, V, dan Si memainkan peran penting dalam evolusi *microstructure*. Unsur Cu dikenal memiliki kecenderungan *segregation* akibat *positive mixing enthalpy* dengan unsur lain, sehingga sering menghasilkan pemisahan *phase* atau *Cu-rich FCC regions* [6]. Sebaliknya, unsur V dan Si berkontribusi pada penguatan BCC *phase* melalui mekanisme *solid-solution strengthening* atau stabilisasi struktur BCC [5, 7]. Dengan demikian, pemilihan unsur tambahan memungkinkan pengendalian keseimbangan antara kekerasan dan keuletan pada HEA *coatings*.

Selain komposisi, **metode deposisi** *coating* sangat mempengaruhi *microstructure* akhir HEA. Proses dengan laju pendinginan tinggi, seperti *laser cladding*, *high velocity air fuel (HVOF)*, dan *detonation spraying*, umumnya menghasilkan *metastable phases*, ukuran butir halus, serta struktur *dendritic* atau *cellular* yang rapat akibat fenomena *rapid solidification* [8, 10]. Pada beberapa kasus, perlakuan *annealing* paskadeposisi menyebabkan homogenisasi *microstructure* dan redistribusi unsur, yang dapat menurunkan kekerasan namun meningkatkan stabilitas *phase* dan ketahanan aus jangka panjang [12].

Karakteristik *microstructure* yang umum dilaporkan pada *Al-based HEA coatings* meliputi struktur *dendritic*, pemisahan *interdendritic*, serta pembentukan *fine precipitates* pada sistem tertentu. *Precipitates* ini, baik berupa *ordered B2 phase* maupun partikel kaya unsur tertentu, berperan sebagai penghalang pergerakan dislokasi dan berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan. Namun, distribusi *precipitates* yang tidak homogen atau *segregation* berlebihan dapat menjadi sumber inisiasi retak, khususnya pada sistem dengan dominasi BCC *phase* yang cenderung lebih rapuh.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa pembentukan *phase* dan *microstructure* pada *Al-based low-cost HEA coatings* merupakan hasil interaksi kompleks antara **desain komposisi**

dan **kondisi proses deposisi**. Pengendalian fraksi *BCC* dan *FCC phases*, serta homogenitas *microstructure*, menjadi kunci untuk mencapai kombinasi optimal antara kekerasan dan ketahanan aus. Kesimpulan fasa dominan dan karakteristik mikrostruktur pada *Al-based HEA coatings* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Fasa Dominan dan Karakteristik Mikrostruktur pada *Al-based HEA Coatings*.

Sistem HEA	Phase Dominan	Karakteristik <i>microstructure</i>	Faktor Pengontrol Utama	Referensi
FeCrMnAlCu	BCC + FCC	Struktur <i>dendritic</i> ; Cu-rich FCC pada <i>interdendritic region</i>	Kandungan Cu dan Mn	[4]
AlCrFeNiV	Dual BCC	Dua BCC phases dengan komposisi berbeda; <i>fine precipitates</i>	Kandungan Al dan V	[5]
AlCrFeNiCu	FCC + BCC	Cu segregation; peningkatan keuletan	Penambahan Cu	[6]
AlCoCrFeNi	BCC/B2 (+ minor FCC)	Fine <i>microstructure</i> akibat <i>rapid solidification</i>	Metode deposisi (HVAF, <i>detonation spraying</i>)	[8]
AlCrCuFeNi + TiC	BCC + TiC	Matriks BCC dengan dispersi partikel TiC	Penguatan keramik	[11]
FeCoNiCuAlSi _x	FCC → BCC	Transformasi phase seiring kenaikan Si	Kandungan Si	[7]

2.3. Kekerasan dan Ketahanan Aus

Kekerasan (*hardness*) dan ketahanan aus (*wear resistance*) merupakan dua parameter utama dalam mengevaluasi performa *wear-resistant coatings*. Pada *Al-based low-cost HEA coatings*, kedua parameter ini sangat dipengaruhi oleh *phase constitution*, karakteristik *microstructure*, serta metode deposisi yang digunakan. Secara umum, literatur menunjukkan rentang kekerasan yang luas, mulai dari nilai menengah hingga sangat tinggi, mencerminkan fleksibilitas desain material pada sistem HEA berbasis aluminium.

Peningkatan *hardness* pada *Al-based HEA coatings* umumnya dikaitkan dengan dominasi BCC atau B2 *ordered phase*. Feng et al., [5] melaporkan bahwa sistem AlCrFeNiV dengan *dual BCC phases* mencapai kekerasan di atas 1000 HV, yang dikaitkan dengan *solid-solution strengthening* dan perbedaan komposisi antar BCC *phases*. Temuan ini menegaskan bahwa pembentukan BCC-*dominant phase* merupakan salah satu mekanisme paling efektif untuk meningkatkan kekerasan pada HEA *coatings*.

Sebaliknya, sistem HEA yang mengandung fraksi FCC lebih besar umumnya menunjukkan kekerasan yang lebih rendah, namun disertai peningkatan keuletan (*ductility*). Ma et al. [4] menunjukkan bahwa FeCrMnAlCu dengan BCC + FCC *microstructure* memiliki *hardness* yang lebih rendah dibandingkan sistem BCC-*dominant*, tetapi menunjukkan ketahanan aus yang stabil karena kemampuan FCC phase dalam menyerap deformasi plastis. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Vignesh et al. [6], yang menemukan bahwa AlCrFeNiCu memiliki kekerasan lebih rendah dibandingkan AlCrFeNiCo, namun dalam kondisi tertentu menunjukkan performa aus yang sebanding akibat berkurangnya kecenderungan *brittle fracture*.

Hubungan antara kekerasan dan *wear resistance* pada HEA *coatings* tidak selalu bersifat linier. Meskipun kekerasan yang tinggi umumnya menurunkan laju keausan abrasif, beberapa studi menunjukkan bahwa *overly hard coatings* dengan dominasi BCC phase dapat mengalami

microcracking atau *delamination* selama pengujian aus akibat rendahnya keuletan. Oleh karena itu, keseimbangan antara kekerasan dan *ductility* menjadi aspek penting dalam desain *Al-based HEA coatings* [8].

Pendekatan lain untuk meningkatkan kekerasan dan *wear resistance* tanpa bergantung sepenuhnya pada *phase control* adalah penggunaan komposit HEA–ceramic. Guo et al. [11] melaporkan bahwa penambahan partikel TiC pada AlCrCuFeNi secara signifikan meningkatkan kekerasan dan menurunkan *wear rate* melalui mekanisme *dispersion strengthening* dan *load-bearing effect*. Strategi serupa juga diterapkan pada sistem HEA–Al₂O₃, di mana partikel oksida keras berfungsi sebagai penghalang keausan sekaligus mengurangi fraksi logam mahal [15].

Selain komposisi dan *microstructure*, metode deposisi coating turut mempengaruhi kekerasan dan *wear behavior*. Proses dengan *cooling rate* tinggi, seperti *laser cladding*, *high velocity air fuel* (HVOF), dan *detonation spraying*, cenderung menghasilkan ukuran butir yang lebih halus dan *metastable phases*, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan [8, 10]. Namun, kondisi deposisi yang tidak optimal dapat meningkatkan porositas atau tegangan sisa, yang pada akhirnya menurunkan *wear resistance* meskipun nilai kekerasan relatif tinggi.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa kekerasan tinggi merupakan prasyarat penting, tetapi bukan satu-satunya faktor penentu *wear resistance* pada *Al-based low-cost HEA coatings*. Kombinasi *phase constitution*, *homogenitas microstructure*, serta keseimbangan antara kekerasan dan *ductility* menjadi kunci untuk mencapai performa aus yang optimal. Tabel 3 menjelaskan kekerasan dan ketahanan aus pada *Al-based HEA coatings*.

Tabel 3. Kekerasan dan ketahanan aus pada *Al-based HEA coatings*.

Sistem HEA	Phase Dominan	Kekerasan (HV)	Karakteristik Ketahanan Aus	Referensi
FeCrMnAlCu	BCC + FCC	~586	Aus stabil; FCC phase meningkatkan keuletan	[4]
AlCrFeNiV	Dual BCC	>1000	<i>Wear rate</i> sangat rendah; dominasi BCC	[5]
AlCrFeNiCu	FCC + BCC	~415	Aus moderat; deformasi plastis menekan retak	[6]
AlCoCrFeNi	BCC/B2	225–648	Ketahanan aus tinggi; sensitif terhadap process parameters	[8]
AlCrCuFeNi + TiC	BCC + TiC	Meningkat signifikan	<i>Wear resistance</i> meningkat melalui <i>dispersion strengthening</i>	[11]
HEA–Al ₂ O ₃ composite	Solid solution + Al ₂ O ₃	~380	Penurunan laju keausan; efek <i>load-bearing</i>	[15]

2.4. Teknik Deposisi Coating

Teknik deposisi *coating* memegang peranan krusial dalam menentukan *microstructure*, pembentukan *phase*, serta performa mekanik dan tribologi pada *Al-based low-cost high entropy alloy (HEA) coatings*. Meskipun desain komposisi menentukan potensi sifat material, proses deposisi mengontrol kondisi termal, laju pendinginan, tingkat oksidasi, porositas, dan kualitas ikatan dengan substrat. Oleh karena itu, pemilihan teknik deposisi yang tepat menjadi faktor kunci dalam realisasi performa *wear-resistant coatings* berbasis HEA.

Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah *laser cladding*. Teknik ini memungkinkan pembentukan lapisan HEA yang relatif tebal dengan ikatan metalurgi yang kuat terhadap substrat. Studi oleh Samoilova et al. [10] serta Guo et al. [11] menunjukkan bahwa *laser cladding* pada *Al-based HEA* menghasilkan *microstructure* dendritik hingga seluler dengan

ukuran butir halus akibat *rapid solidification*. Kondisi ini mendukung pembentukan *BCC* atau *BCC/B2 phases* yang berkontribusi terhadap peningkatan *hardness*. Namun, masukan panas yang tinggi pada *laser cladding* juga dapat memicu *elemental dilution* dari substrat dan tegangan sisa, yang berpotensi menurunkan performa aus apabila parameter proses tidak dioptimalkan [9].

Pendekatan lain yang berkembang adalah *cold spray* yang dikombinasikan dengan *post-remelting*. Proses *cold spray* memungkinkan deposisi partikel *HEA* dalam keadaan padat dengan oksidasi minimal, sementara tahap *remelting* digunakan untuk meningkatkan densitas dan homogenitas lapisan. Ma et al. [4] melaporkan bahwa kombinasi ini efektif menghasilkan *FeCrMnAlCu coating* dengan *microstructure* yang lebih beragam dan peningkatan *hardness* dibandingkan kondisi *as-sprayed*. Selain itu, Sheibanian et al. [12] menunjukkan bahwa *post-annealing* pada *cold-sprayed HEA coatings* dapat menurunkan kekerasan tetapi meningkatkan kestabilan *microstructure* dan performa aus jangka panjang.

Teknik *thermal spraying* berkecepatan tinggi, seperti *high velocity air fuel (HVOF)* dan *high velocity oxy-fuel (HVOF)*, juga banyak diterapkan untuk deposisi *HEA coatings*. Metode ini dicirikan oleh *particle velocity* yang tinggi dan waktu interaksi *thermal* yang singkat, sehingga menghasilkan lapisan dengan porositas rendah dan oksidasi minimal. Löbel et al. [13] dan Sagdoldina et al. [8] melaporkan bahwa *HVOF-sprayed Al-based HEA coatings* menunjukkan *microstructure* yang sangat halus dengan pembentukan *metastable BCC/B2 phases*, yang berkorelasi dengan peningkatan *hardness* dan ketahanan aus. Dibandingkan *HVOF*, *HVOF* umumnya menghasilkan oksidasi yang lebih rendah dan ikatan antarpartikel yang lebih baik.

Selain itu, *detonation spraying* merupakan teknik *thermal spray* berenergi tinggi yang mampu menghasilkan *coating* dengan densitas tinggi dan ukuran butir sangat halus. Sagdoldina et al. [8] menunjukkan bahwa *detonation-sprayed AlCoCrFeNi coatings* memiliki rentang *hardness* yang luas dan performa aus yang baik, bergantung pada parameter ledakan dan energi kinetik partikel. Namun, kompleksitas peralatan dan kontrol proses menjadi tantangan dalam penerapan teknik ini pada skala industri.

Tabel 4. Teknik deposisi *coating* pada *Al-based HEA* dan karakteristik utamanya.

Teknik Deposisi	Karakteristik Proses	Microstructure Khas	Keunggulan	Keterbatasan	Referensi
<i>Laser cladding</i>	Masukan panas tinggi, <i>rapid solidification</i>	<i>Dendritic/cellular, BCC/B2</i>	Ikatan kuat, lapisan tebal	Dilusi substrat, tegangan sisa	[9], [10], [11]
<i>Cold spray + remelting</i>	Deposisi padat + <i>post-heating Particle velocity</i>	Homogen, porositas rendah	Oksidasi rendah, kontrol komposisi	Proses dua tahap	[4], [12]
HVOF/HVOF	tinggi, panas singkat	Butir sangat halus, <i>metastable phases</i>	Densitas tinggi, oksidasi rendah	Ketebalan terbatas	[8], [13]
<i>Detonation spraying</i>	Energi kinetik sangat tinggi	<i>Ultra-fine microstructure</i>	Kekerasan dan ketahanan aus tinggi	Kontrol proses kompleks	[8]
<i>Friction stir processing</i>	Deformasi plastis intens	<i>Surface composite homogen</i>	Tanpa pelelehan, oksidasi minimal	Lapisan tipis	[16]

Teknik *friction stir processing (FSP)* juga digunakan sebagai pendekatan alternatif untuk membentuk *surface composite coatings*. Dalam metode ini, partikel *HEA* dicampurkan secara

mekanik ke dalam permukaan substrat melalui deformasi plastis intens. Soundararajan et al. [16] melaporkan bahwa *HEA-reinforced surface layers* yang dihasilkan melalui *FSP* menunjukkan peningkatan *hardness* dan *wear resistance* yang signifikan, meskipun ketebalan lapisan relatif terbatas dibandingkan teknik deposisi termal. Tabel 4 mendeskripsikan terkait teknik deposisi *coating* pada *Al-based HEA* dan karakteristik utamanya.

2.5. Perbandingan dan Diskusi Kritis

Berdasarkan kajian terhadap literatur yang ada, dapat disimpulkan bahwa performa *Al-based low-cost high entropy alloy (HEA) coatings* tidak ditentukan oleh satu faktor tunggal, melainkan oleh interaksi kompleks antara desain komposisi, pembentukan *phase*, karakteristik *microstructure*, dan teknik deposisi *coating*. Oleh karena itu, perbandingan kritis antar pendekatan menjadi penting untuk mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, serta potensi penerapan industri dari masing-masing sistem.

Dari sisi **komposisi material**, sistem *Co-free* atau *Ni-reduced* secara umum menawarkan keuntungan biaya yang jelas dibandingkan *Co-containing HEA*. Studi oleh Feng et al. [5] menunjukkan bahwa sistem *AlCrFeNiV* tanpa *Co* mampu mencapai kekerasan yang sangat tinggi melalui dominasi *dual BCC phases*. Sebaliknya, sistem yang masih mengandung *Co* atau *Ni*, seperti *AlCoCrFeNi*, tetap menarik karena stabilitas *microstructure* dan kemudahan proses deposisi, meskipun dengan konsekuensi biaya material yang lebih tinggi [8, 13]. Hal ini menunjukkan adanya *trade-off* yang jelas antara **biaya material** dan **fleksibilitas proses serta kestabilan struktur**.

Dari perspektif *phase constitution*, sistem dengan dominasi *BCC* atau *BCC/B2 phases* secara konsisten menunjukkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan sistem dengan fraksi *FCC* yang signifikan. Namun, *BCC-dominant HEA coatings* cenderung memiliki keuletan yang lebih rendah dan berpotensi mengalami *microcracking* atau *brittle failure* selama pengujian aus, terutama pada kondisi beban tinggi. Sebaliknya, keberadaan *FCC phase*, seperti pada *FeCrMnAlCu* atau *AlCrFeNiCu*, meningkatkan kemampuan deformasi plastis dan dapat menghasilkan performa aus yang sebanding meskipun nilai kekerasan lebih rendah [4, 6]. Temuan ini menegaskan bahwa kekerasan tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan *wear resistance*.

Pendekatan **komposit HEA–ceramic** muncul sebagai strategi yang efektif untuk mengatasi keterbatasan sistem *HEA monolitik*. Penambahan partikel keras seperti *TiC* atau *Al₂O₃* terbukti meningkatkan kekerasannya dan menurunkan *wear rate* melalui mekanisme *dispersion strengthening* dan *load-bearing effect*, tanpa perlu menambahkan unsur logam mahal [11, 15]. Meskipun demikian, tantangan utama pada sistem komposit adalah menjaga distribusi partikel yang homogen dan mencegah inisiasi retak pada antarmuka *matrix–reinforcement*, terutama pada *coating* yang mengalami siklus beban berulang.

Dari sisi **teknik deposisi**, metode dengan *cooling rate* tinggi seperti *HVAF*, *detonation spraying*, dan *laser cladding* cenderung menghasilkan *microstructure* yang halus dan *metastable phases*, yang mendukung peningkatan kekerasan. Namun, metode ini juga berpotensi menimbulkan tegangan sisa dan heterogenitas lokal apabila parameter proses tidak dioptimalkan [8, 10]. Sebaliknya, pendekatan *cold spray* yang dikombinasikan dengan *post-remelting* menawarkan kontrol oksidasi yang lebih baik dan homogenitas komposisi, meskipun membutuhkan tahapan proses tambahan [4, 12].

Secara kritis, sebagian besar studi yang ada masih bersifat skala laboratorium dan menggunakan kondisi pengujian aus yang bervariasi, sehingga menyulitkan perbandingan kuantitatif langsung antar sistem *HEA*. Selain itu, aspek seperti *long-term wear behavior*,

ketahanan terhadap *thermal cycling*, serta analisis *techno-economic* jarang dibahas secara mendalam. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *Al-based low-cost HEA coatings* menunjukkan potensi besar, masih diperlukan penelitian lanjutan untuk menjembatani kesenjangan antara hasil laboratorium dan aplikasi industri. Tabel 5 menjelaskan perbandingan kritis pendekatan pada *Al-based HEA coatings*.

Tabel 5. Perbandingan kritis pendekatan pada *Al-based HEA coatings*.

Aspek Perbandingan	Pendekatan/Sistem	Keunggulan	Kelemahan	Referensi
Komposisi	<i>Co-free</i> HEA	Biaya rendah, hardness sangat tinggi	Keuletan rendah, risiko brittleness	[5]
	<i>Co-containing</i> HEA	Stabilitas microstructure, proses matang	Biaya material lebih tinggi	[8]
<i>Phase constitution</i>	<i>BCC-dominant</i>	Hardness tinggi, aus abrasif rendah	Rentan retak	[5]
	<i>FCC-containing</i>	Keuletan tinggi, aus stabil	Kekerasan lebih rendah	[4], [6]
Strategi penguatan	<i>HEA-ceramic composite</i>	Wear resistance sangat baik, biaya efisien	Tantangan homogenitas	[11], [15]
Teknik deposisi	<i>HVOF / detonation spraying</i>	Lapisan padat, oksidasi rendah	Kontrol proses kompleks	[8], [13]
	<i>Cold spray + remelting</i>	Komposisi homogen, oksidasi minimal	Proses bertahap	[4]

2.6. Tantangan Penerapan Industri dan Arah Pengembangannya

Meskipun *Al-based low-cost high entropy alloy (HEA) coatings* menunjukkan potensi yang menjanjikan sebagai material pelapis tahan aus, penerapannya pada skala industri masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satu tantangan utama adalah memastikan kestabilan mikrostruktur dan fasa pada kondisi operasi jangka panjang yang melibatkan beban mekanik tinggi, gesekan berulang, serta fluktuasi temperatur. Selain itu, sebagian besar studi yang tersedia masih dilakukan pada kondisi laboratorium yang terkontrol, sehingga perilaku aus dan degradasi lapisan pada lingkungan operasi nyata, seperti kombinasi aus abrasif, adhesif, dan korosif, belum sepenuhnya terwakili. Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah konsistensi kualitas lapisan, termasuk porositas, tegangan sisa, dan ikatan dengan substrat, khususnya ketika proses deposisi ditingkatkan ke skala produksi.

Dari sisi pengembangan ke depan, diperlukan pendekatan yang lebih terintegrasi antara desain komposisi paduan, optimasi parameter deposisi *coating*, dan evaluasi performa pada kondisi mendekati aplikasi nyata. Penggunaan *Al-based HEA* sebagai *coating*, bukan material *bulk*, tetap menjadi strategi yang menjanjikan untuk menekan biaya material. Selain itu, pengembangan sistem *HEA-ceramic composite* dan pemanfaatan teknik deposisi yang efisien secara energi dapat

membuka peluang peningkatan ketahanan aus tanpa meningkatkan kompleksitas proses secara signifikan. Dengan demikian, penelitian lanjutan yang menekankan uji ketahanan jangka panjang, analisis kesiapan industri, serta evaluasi ekonomi proses akan menjadi kunci dalam mendorong adopsi *Al-based low-cost HEA coatings* pada aplikasi industri yang lebih luas.

3. KESIMPULAN

Kajian literatur mengenai *Al-based low-cost high entropy alloy (HEA) coatings* untuk aplikasi *wear-resistant* telah dilakukan. Fokus pembahasan diarahkan pada hubungan antara desain material, pembentukan *phase*, karakteristik *microstructure*, serta teknik deposisi *coating* dalam menentukan performa kekerasan dan ketahanan aus.

1. *Al-based low-cost HEA coatings* menunjukkan potensi yang kuat sebagai alternatif *wear-resistant coating* yang lebih ekonomis dibandingkan sistem konvensional berbasis *Co* atau *Ni*.
2. Aluminium berperan penting dalam menurunkan biaya material sekaligus menstabilkan *body-centered cubic (BCC)* atau *B2 ordered phase*, yang berkontribusi terhadap peningkatan *hardness* dan ketahanan aus.
3. Pembentukan *phase constitution* yang seimbang antara *BCC* dan *face-centered cubic (FCC)* menjadi kunci untuk mencapai kompromi optimal antara *hardness* dan keuletan, sehingga mencegah kegagalan rapuh pada *coating*.
4. Pendekatan penggunaan *HEA* sebagai *coating*, bukan material *bulk*, terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi material mahal tanpa mengorbankan fungsi permukaan.
5. Strategi *HEA-ceramic composite* memberikan peningkatan *wear resistance* melalui mekanisme *dispersion strengthening* dengan biaya yang relatif rendah.
6. Teknik deposisi *coating* berperan krusial dalam mengontrol *microstructure* dan performa akhir, sehingga optimasi parameter proses menjadi aspek penting dalam implementasi praktis.

Secara keseluruhan, kajian ini menunjukkan bahwa pengembangan *Al-based low-cost HEA coatings* merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan industri akan material pelapis tahan aus yang ekonomis dan berkinerja tinggi. Namun, untuk mendorong adopsi yang lebih luas, penelitian lanjutan masih diperlukan terkait kestabilan jangka panjang, evaluasi pada kondisi operasi nyata, serta analisis kelayakan teknis dan ekonomi pada skala industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sharma, "High entropy alloy coatings and technology," *Coatings*, vol. 11, no. 4, 2021, doi: 10.3390/coatings11040372.
- [2] W. Li, D. Xie, D. Li, Y. Zhang, Y. Gao, and P. K. Liaw, "Mechanical behavior of high-entropy alloys," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 118, no. January, p. 100777, 2021, doi: 10.1016/j.pmatsci.2021.100777.
- [3] S. K. Nemani *et al.*, "High-Entropy 2D Carbide MXenes: TiVNbMoC₃ and TiVCrMoC₃," *ACS Nano*, 2021, doi: 10.1021/acsnano.1c02775.
- [4] K. Ma, L. Feng, and Z. Wang, "Microstructure and Properties of FeCrMnxAlCu High-Entropy Alloys and Coatings," *Coatings*, vol. 13, p. 1401, 2023, doi: 10.3390/coatings13081401.
- [5] C. Feng, X. Wang, L. Yang, Y. Guo, and Y. Wang, "High Hardness and Wear Resistance in AlCrFeNiV High-Entropy Alloy Induced by Dual-Phase Body-Centered Cubic Coupling Effects," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/ma15196896.
- [6] M. Vignesh *et al.*, "Influence of Cu and Co addition on metallurgical and wear characteristics of AlCrFeNi high entropy alloy," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-

- 76350-9.
- [7] X. Zhang *et al.*, “Study on Microstructures and Properties of FeCoNiCuAlSix High-Entropy Alloy Composite Coatings by Laser Cladding,” *Micromachines*, vol. 16, no. 11, pp. 1–14, 2025, doi: 10.3390/mi16111211.
 - [8] Z. Sagdoldina, L. Sulyubayeva, D. Buitkenov, and Y. Kambarov, “Microstructure, Hardness and Tribological Characteristics of High-Entropy Coating Obtained by Detonation Spraying,” *Crystals*, vol. 15, no. 7, pp. 1–13, 2025, doi: 10.3390/cryst15070625.
 - [9] B. Chen, Y. Zhao, H. Yang, and J. Zhao, “Process Parameters Optimization and Numerical Simulation of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coating via Laser Cladding,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 17, 2024, doi: 10.3390/ma17174243.
 - [10] O. SamoiloVA, N. Shaburova, K. Pashkeev, M. Samodurova, and E. Trofimov, “Laser Cladding on Stainless Steel,” *Mater. Des.*, vol. 210, p. 110068, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110068>
 - [11] J. Guo, C. Liu, D. Wang, L. Xu, K. Song, and M. Gao, “Structure and Wear Resistance of TiC-Reinforced Al1.8CrCuFeNi2 High-Entropy Alloy Coating Using Laser Cladding,” *Materials (Basel)*, vol. 16, p. 3422, 2023.
 - [12] N. Sheibanian, R. Sesana, M. D. Abyaneh, S. Özbilen, and R. Lupoi, “Surface, Microstructure, and Wear Characterization of Annealed Cold-Sprayed HEA Coatings,” *Eng. Proc.*, vol. 85, no. 1, pp. 1–9, 2025, doi: 10.3390/engproc2025085035.
 - [13] M. Löbel *et al.*, “Microstructure and Corrosion Properties of AlCrFeCoNi High-Entropy Alloy Coatings Prepared by HVAF and HVOF,” *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 31, no. 1–2, pp. 247–255, 2022, doi: 10.1007/s11666-021-01255-2.
 - [14] I. S. Batraev *et al.*, “A Feasibility Study of High-Entropy Alloy Coating Deposition by Detonation Spraying Combined with Laser Melting,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 13, 2022, doi: 10.3390/ma15134532.
 - [15] Y. Zhang *et al.*, “Surface reinforcement of magnesium alloy achieved via high entropy alloys/Al2O3 composite coating manufactured by middle-low temperature micro-particles deposition,” *J. Manuf. Process.*, vol. 151, no. April, pp. 160–172, 2025, doi: 10.1016/j.jmapro.2025.07.033.
 - [16] S. Soundararajan *et al.*, “Investigating the tribological characteristics of copper surface composites reinforced with high entropy alloy (AlCoCrCuFe) through friction stir processing,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-49557-5.