

Potensi Material High Entropy Alloys (HEAs) untuk Aplikasi Lapis Baja: Tinjauan Sifat Mekanik dan Ketahanan Benturan Balistik

Andy Marjono Putranto¹ Sovian Aritonang² Erzi Agson Gani³ Ani Widuri⁴ Lalu Aan Sasaka Akbar⁵

Program Studi Teknologi Daya Gerak, Universitas Pertahanan RI^{1,2,3,4,5}
Badan Riset dan Inovasi Nasional^{1,5}

Email: andi.putranto@tp.idu.ac.id¹ sovia.aritonang@idu.ac.id² erzi.gani@idu.ac.id³
ani.widuri@tp.idu.ac.id⁴ lalu.akbar@tp.idu.ac.id⁵

Abstrak

Kebutuhan akan material pelindung dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi semakin meningkat seiring dengan tuntutan mobilitas dan efisiensi sistem pertahanan modern. High Entropy Alloys (HEAs), sebagai kelas material logam multikomponen berbasis multi-principal elements, menawarkan pendekatan nonkonvensional dalam desain paduan yang berpotensi melampaui performa baja armor konvensional. Studi ini meninjau secara komprehensif perkembangan terbaru mengenai sifat mekanik, perilaku deformasi dinamis, dan ketahanan benturan balistik dari berbagai sistem HEAs. Melalui pendekatan systematic literature review, artikel ini mengidentifikasi empat efek inti HEAs seperti entropi tinggi, distorsi kisi, difusi lambat, dan efek koktail sebagai faktor fundamental yang menghasilkan kombinasi luar biasa antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan. Dibandingkan dengan lapis baja seperti Ramor 550 dan Armox 500T yang memiliki kekuatan spesifik (specific strength) 159–208 MPa·g/cm³, beberapa HEAs (misalnya AlCuFeMnMgTi) menunjukkan nilai hingga >500 MPa·g/cm³ dengan kekerasan mencapai 770 HV. Temuan ini menunjukkan bahwa HEAs mampu mencapai efisiensi struktural dan ketahanan deformasi lebih tinggi pada densitas yang lebih rendah, menjadikannya kandidat unggul untuk aplikasi armor ringan berperforma tinggi. Tantangan utama yang diidentifikasi meliputi optimasi komposisi, kontrol mikrostruktur selama pemrosesan, serta isu biaya dan skalabilitas manufaktur. Kajian ini menegaskan bahwa dengan integrasi antara desain berbasis komputasi, powder metallurgy, dan arsitektur material berlapis atau hibrida, HEAs berpotensi menjadi material strategis dalam pengembangan lapis baja generasi mendatang yang ringan, tangguh, dan adaptif terhadap ancaman balistik modern.

Kata Kunci: High Entropy Alloys, Lapis Baja, Ketahanan Balistik, Kekuatan Spesifik, Deformasi Dinamis



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material pelindung, khususnya lapis baja dan perlindungan balistik, terus meningkat seiring dengan dinamika geopolitik global dan eskalasi ancaman militer maupun terorisme bersenjata. Pasar material pelindung dunia mengalami pertumbuhan signifikan, didorong oleh kebutuhan militer, penegak hukum, serta sektor sipil seperti kendaraan taktis dan infrastruktur vital. Laporan terbaru memperkirakan bahwa pasar baja balistik global mencapai USD 1,2 Miliar pada tahun 2024 dan akan mencapai nilai lebih dari USD 2,3 miliar pada 2033, dengan pertumbuhan tahunan sekitar 8% dari tahun 2026 hingga 2033 (Verified Market Report, 2025). Di sisi lain, peningkatan tuntutan mobilitas dan efisiensi mendorong pencarian material baru yang tidak hanya kuat dan tangguh, tetapi juga ringan serta tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Hal ini menjadikan pengembangan material pelindung sebagai salah satu fokus strategis dalam riset pertahanan dan rekayasa material. Pengembangan material pelindung kendaraan lapis baja terus dilakukan guna menghadapi ancaman senjata ringan yang semakin efektif. Upaya ini difokuskan pada penciptaan baja dengan ketahanan balistik lebih baik, serta peningkatan karakteristik taktis dan teknis.

Kompleksitas ilmiah dan teknis dalam merancang material pelindung menuntut pendekatan baru yang memanfaatkan kemajuan metalurgi, ilmu material, dan teknologi fabrikasi. Tren pengembangan senjata modern mendorong pemanfaatan material berteknologi tinggi dan metode inovatif yang meningkatkan efektivitas proteksi tanpa menambah massa maupun dimensi (Kononenko et al., 2022). Respons balistik suatu material ditentukan oleh komposisi kimianya (Geantă et al., 2018), kombinasi struktur mikro, kekuatan, keuletan (Z. Wang et al., 2025), dan ketangguhannya (Muskeri et al., 2022). Hubungan antara kekuatan atau kekerasan logam dengan performa balistik bersifat kompleks, namun umumnya peningkatan kekuatan material akan memperbaiki ketahanan terhadap deformasi plastis dan meningkatkan kinerja balistik.

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi logam dan paduan untuk aplikasi pelindung, termasuk aluminium berkekuatan tinggi, titanium, tembaga, baja dalam berbagai bentuk, serta struktur baja-alumina berlapis. Dari material tersebut, baja Rolled homogenous armor (RHA) banyak dikaji karena kekuatan, ketangguhan, dan kemampuan penyerapan energinya. Namun, peningkatan kinerja balistik RHA dalam beberapa dekade terakhir bersifat terbatas akibat mekanisme deformasi dan mode kegagalan yang konvensional. Oleh karena itu, pengembangan sistem paduan baru dengan mekanisme deformasi yang lebih inovatif diperlukan untuk mencapai peningkatan balistik yang signifikan (Muskeri et al., 2022). Paduan entropi tinggi (HEA) menarik perhatian luas berkat strategi desain nonkonvensional, mekanisme fisik unik, dan sifat mekanik unggul, khususnya kemampuan pengerasan regangan yang sangat baik. Karakteristik ini menunjukkan potensi besar HEA untuk aplikasi proteksi balistik karena kekuatan dan ketahanan benturannya yang tinggi (Madewu, 2025)(Tang & Li, 2022)(Zhao & Li, 2022), meskipun kajian mengenai penerapannya masih sangat terbatas. *High Entropy Alloys (HEA)* merupakan paduan berbasis multi-principal elements yang terdiri dari minimal 5 elemen utama dalam persen atom dengan kisaran nilai 5 – 35 at.%(Gelchinski et al., 2022)(Z. Wang & Zhang, 2023). Paduan ini umumnya membentuk fase larutan padat tunggal atau ganda dan menunjukkan sifat mekanik yang unggul, meliputi kekuatan, keuletan dan ketahanan korosi tinggi (Madewu, 2025), ketangguhan patah yang baik, kekerasan tinggi, pengerasan kerja yang efektif, sensitivitas laju regangan yang superior, serta ketahanan lelah dan aus yang baik (Saideep Muskeri. et al, 2021). Ikatan atom yang lebih kuat dan kepadatan dislokasi yang lebih besar memungkinkan paduan HEA mengalami pengerasan regangan dengan lebih efektif, sehingga meningkatkan ketangguhannya dalam menahan deformasi berkecepatan tinggi dan beban impak yang besar (Ujah et al., 2024)(Dewangan et al., 2024).

Dari perspektif strategis, HEAs menawarkan peluang untuk mengembangkan lapis baja yang lebih ringan tanpa mengorbankan perlindungan, sebuah aspek vital dalam mobilitas dan efisiensi logistik militer modern. Namun, tantangan utama yang dihadapi adalah optimalisasi komposisi dan struktur mikro HEAs agar ketahanan balistik maksimal dapat dicapai secara konsisten serta pemahaman lengkap tentang mekanisme deformasi dinamik selama benturan. Selain itu, isu biaya produksi, ketersediaan unsur paduan, dan skalabilitas manufaktur juga menjadi faktor penting yang menghambat adopsi lebih luas di industri pertahanan. Oleh karena itu, kebutuhan akan penelitian lebih lanjut muncul karena beberapa keterbatasan studi terdahulu yang kurang menunjukkan data perbandingan langsung antara HEAs dengan material lapis baja komersial dalam konteks proteksi balistik. Kajian ini akan mengisi kebutuhan tersebut dengan mengkaji sifat mekanik dan ketahanan benturan balistik berbagai HEAs yang dikembangkan khusus untuk aplikasi lapis baja. Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bertujuan untuk meninjau potensi HEAs sebagai material lapis baja, dengan fokus pada sifat mekanik serta ketahanan benturan balistiknya. Manfaat teoritis dari kajian ini adalah memperkaya pemahaman mengenai hubungan antara komposisi, mikrostruktur, sifat mekanik,

dan performa dinamis HEAs. Dari sisi praktis, hasil kajian diharapkan dapat memberikan acuan bagi pengembangan material pelindung generasi baru yang lebih ringan, lebih kuat, dan lebih tahan lama, sehingga berkontribusi pada peningkatan efektivitas sistem pertahanan modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan literature review sistematis untuk menelaah perkembangan riset mengenai *High Entropy Alloys (HEAs)* dalam aplikasi lapis baja, dengan fokus pada sifat mekanik dan ketahanan terhadap benturan balistik. Pencarian literatur dilakukan melalui berbagai sumber ilmiah bereputasi, termasuk jurnal-jurnal internasional terindeks, buku akademik, serta publikasi relevan lainnya. Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi melalui tahapan penyaringan judul, abstrak, dan isi penuh guna memastikan kesesuaian dengan kriteria penelitian. Untuk menjaga validitas kajian, hanya literatur dari jurnal peer-reviewed bereputasi yang dijadikan rujukan utama.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Konsep Dasar High Entropy Alloys (HEAs)

High Entropy Alloys (HEAs) pertama kali diperkenalkan oleh Yeh et al., 2004 sebagai konsep baru paduan berbasis multi-principal element. Tidak seperti paduan konvensional yang biasanya didominasi satu atau dua elemen utama, HEAs menggabungkan lima elemen atau lebih dalam proporsi hampir sama sebagai unsur paduan tanpa membedakan atom pelarut dan zat terlarut (W. Li et al., 2021). HEAs menunjukkan sejumlah perbedaan dibandingkan paduan konvensional, yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Antara Paduan Konvensional Berkonsentrasi Rendah Dan Paduan Entropi Tinggi (Heas) Dari Berbagai Aspek Ilmiah

Aspek	Paduan konvensional berkonsentrasi rendah	Paduan entropi tinggi (HEAs)
Ruang komposisi	Berdimensi rendah	Berdimensi tinggi hingga hiperdimensi
Komposisi	Terbatas pada beberapa elemen utama	Hampir tak terbatas, mencakup berbagai kombinasi unsur
Strategi perancangan paduan	Berdasarkan satu elemen utama	Berdasarkan beberapa elemen utama secara seimbang
Konsentrasi unsur sekunder	Rendah	Tinggi atau terkonsentrasi
Larutan padat	Atom pelarut dan zat terlarut dapat dibedakan dengan jelas	Atom pelarut dan zat terlarut sulit dibedakan karena distribusi homogen
Diagram fasa	Terletak pada daerah tepi atau sudut	Berada di wilayah pusat dari ruang komposisi multielemen
Entropi konfigurasional pencampuran	Rendah	Tinggi
Ketidakselarasan modulus elastisitas	Ringan	Signifikan atau parah
Ketidakselarasan ukuran atom	Ringan	Signifikan atau parah
Distorsi kisi kristal	Ringan	Signifikan akibat perbedaan ukuran atom yang besar
Mikrostruktur	Kurang beragam dan relatif sederhana	Lebih beragam dengan konfigurasi mikro yang kompleks
Sifat-sifat material	Terbatas pada rentang tertentu	Menunjukkan berbagai kemungkinan sifat yang luas
Difusi atomik	Relatif cepat	Melambat (efek difusi lamban)
Penguatan akibat larutan padat	Lemah	Kuat karena interaksi antaratom yang kompleks

Sumber: (W. Li et al., 2021)

Definisi awal paduan entropi tinggi didasarkan pada entropi pencampuran, yaitu ukuran tingkat ketidakaturan sistem. Semakin banyak keadaan mikroskopis yang mungkin terjadi pada suatu sistem, semakin besar pula entropinya. Pada paduan dengan atom-atom unsur utama berperbandingan molar sama, entropi pencampuran mencapai nilai maksimum yang dapat dinyatakan sebagai berikut: $\Delta S_{\text{mix}} = R \ln n$, di mana ΔS_{mix} adalah entropi pencampuran, R adalah konstanta gas molar, $8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$, dan n adalah jumlah unsur utama dalam sistem paduan. Ketika ΔS_{mix} kurang dari R , dapat didefinisikan sebagai paduan entropi rendah, ketika ΔS_{mix} antara $1 R$ dan $1,5 R$, dapat didefinisikan sebagai paduan entropi sedang dan untuk paduan entropi tinggi, ΔS_{mix} lebih besar dari $1,5 R$ (Z. Wang & Zhang, 2023). Keberadaan lima atau lebih unsur utama dalam komposisi hampir ekuatomik menghasilkan entropi pencampuran tinggi (ΔS_{mix}), yang berimplikasi langsung terhadap pembentukan fasa padat sederhana (seperti FCC, BCC, atau HCP) dibandingkan senyawa intermetalik yang rapuh. Dalam konteks aplikasi lapis baja, hal ini sangat krusial karena kestabilan fasa padat tunggal berperan dalam menjaga keseimbangan antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan yang merupakan tiga parameter mekanik utama yang menentukan ketahanan material terhadap benturan balistik.

Nilai entropi pencampuran yang tinggi (lebih dari $1,5 R$) menandakan tingkat ketidakaturan atom yang besar, menciptakan medan tegangan internal yang tidak homogen dalam kisi kristal. Ketidakteraturan ini memperlambat pergerakan dislokasi dan memperkuat mekanisme pengerasan regangan (strain hardening), yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan luluh dan ketahanan deformasi plastis saat menerima tumbukan berenergi tinggi. Dengan kata lain, efek entropi tinggi tidak hanya meningkatkan stabilitas mikrostruktur pada temperatur ekstrem yang dihasilkan oleh benturan proyektil, tetapi juga memperkuat kemampuan HEAs dalam menyerap energi kinetik tanpa mengalami kegagalan struktur dini. Selain itu, pendekatan desain berbasis entropi membuka peluang besar untuk rekayasa komposisi adaptif yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan lapis baja modern—misalnya melalui kombinasi elemen yang menghasilkan fasa BCC dominan untuk kekuatan tinggi, atau campuran FCC-BCC untuk memperoleh kompromi antara kekuatan dan keuletan. Dengan demikian, konsep dasar HEAs bukan sekadar inovasi dalam kimia paduan, tetapi juga menjadi landasan ilmiah yang menjanjikan bagi pengembangan material armor generasi berikutnya yang menuntut performa tinggi terhadap deformasi, retakan, dan penetrasi balistik.

Efek Inti High Entropy Alloys (HEAs)

Empat efek inti yang sering dikaitkan dengan HEAs adalah entropi tinggi yang menstabilkan fasa, distorsi kisi yang parah akibat perbedaan ukuran atom, difusi atom yang lambat, serta efek koktail, yaitu kombinasi sifat unik dari banyak elemen yang tidak ditemukan pada paduan konvensional (Pickering & Jones, 2016) (Hsu et al., 2024).

1. Efek entropi tinggi, Tingginya entropi pencampuran pada sistem High Entropy Alloys (HEAs) meningkatkan kelarutan timbal balik antar unsur penyusunnya. Secara termodinamika, efek ini menunjukkan bahwa fasa dengan nilai entropi tinggi memiliki energi bebas Gibbs yang lebih rendah, sehingga menjadi lebih stabil. Dengan demikian, entropi pencampuran yang besar berperan penting dalam menstabilkan larutan padat fasa tunggal, selama kontribusi entropinya mampu mengimbangi atau melampaui entalpi pembentukan fasa intermetalik yang berpotensi terbentuk, khususnya pada temperatur tinggi (Mooraj & Chen, 2023).
2. Distorsi kisi yang parah, Pada sistem High Entropy Alloys (HEAs), variasi ukuran atom antar elemen penyusunnya menimbulkan perbedaan konfigurasi ikatan serta fluktuasi energi kisi lokal, yang berujung pada terbentuknya distorsi kisi yang signifikan. Distorsi ini menghalangi pergerakan dislokasi dalam struktur kristal, sehingga memperkuat material melalui mekanisme solid solution strengthening (Mooraj & Chen, 2023).

3. Difusi yang lambat, Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa difusi unsur dalam sistem High Entropy Alloys (HEAs) umumnya berlangsung jauh lebih lambat dibandingkan dengan sistem paduan biner. Laju difusi yang rendah ini berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas fasa larutan padat karena mampu menekan pembentukan fasa intermetalik yang tidak diinginkan. Selain itu, difusi yang terhambat juga mengurangi laju pengasaran butir, sehingga meningkatkan stabilitas termal serta kinerja termomekanis material pada suhu tinggi (Mooraj & Chen, 2023).
4. Efek koktail, munculnya sifat-sifat sinergis pada paduan dengan komposisi yang kompleks. Fenomena ini mencerminkan karakteristik tak terduga yang sering ditemukan pada High Entropy Alloys (HEAs), di mana kombinasi spesifik dari berbagai unsur mampu menghasilkan perilaku sinergis yang tidak dapat diperkirakan hanya dari sifat masing-masing unsur penyusunnya (Mooraj & Chen, 2023).

Kombinasi keempat efek inti ini memungkinkan tercapainya keseimbangan optimal antara kekuatan, keuletan, dan ketangguhan, yang berperan langsung dalam kemampuan HEAs untuk menahan retakan, deformasi, serta penetrasi peluru.

Sifat Mekanik dan Perilaku Deformasi Dinamis HEAs

Kekuatan dan daktilitas merupakan sifat mekanik utama yang menentukan kinerja material struktural. Sebagai kelas material logam multikomponen, High-Entropy Alloys (HEAs) menawarkan peluang luas untuk mengeksplorasi sifat-sifat struktural yang unik melalui penyesuaian komposisi elemen-elemen utamanya. Kompleksitas kimia dan proses termomekanis pada HEA berperan penting dalam membentuk mikrostruktur serta menentukan sifat mekaniknya. Di antara berbagai parameter, kekuatan dan daktilitas memiliki relevansi paling besar terhadap aplikasi struktural. Kedua sifat tersebut sangat dipengaruhi oleh komposisi, mikrostruktur, suhu operasi, serta metode fabrikasi dan perlakuan proses paduan (W. Li et al., 2021). Studi terkini juga menunjukkan bahwa HEAs dapat diproduksi melalui berbagai metode seperti *arc melting*, *powder metallurgy*, *casting*, *direct laser deposition* (DLD), *selective laser melting* (SLM) and *selective electron beam melting* (SEBM) dan *additive manufacturing* (F. Liu et al., 2022), yang masing-masing memberikan pengaruh signifikan pada homogenitas mikrostruktur dan performa mekanik. Variasi teknik maupun parameter pemrosesan, seperti laju pendinginan atau perlakuan termo-mekanis (homogenisasi, penempaan, penggulangan, anil, tempering, penuaan, dan sebagainya), dapat menghasilkan perubahan signifikan pada kekuatan dan keuletan. Dengan banyaknya kemungkinan kombinasi suhu, waktu, dan metode, ruang pemrosesan termo-mekanis pada dasarnya bersifat sangat luas. Mikrostruktur mencakup konstitusi fasa, ukuran butir, dislokasi, kembaran, patahan susun, serta presipitat dengan ukuran dan distribusinya. Seluruh fitur ini, baik secara terpisah maupun bersama-sama, sangat memengaruhi kekuatan dan daktilitas HEAs.

Paduan HEA umumnya menunjukkan kombinasi kekuatan-keuletan yang melampaui paduan konvensional. Misalnya, paduan CrMnFeCoNi yang dibuat menggunakan teknik *mechanical alloying* dan *sintering* menunjukkan kekuatan mekanik yang sangat baik, dengan kekuatan tarik maksimum $1300 \pm 11,6$ MPa dan elongasi melebihi $4\% \pm 0,6\%$ (Xing et al., 2023b). Pada rentang suhu rendah hingga kriogenik, HEA CrMnFeCoNi menunjukkan performa mekanik yang unggul, ditandai dengan kombinasi antara kekuatan, laju pengerasan kerja, keuletan, dan ketangguhan fraktur yang seimbang (Laplanche et al., 2016). Kajian pada tingkat mikro mengungkap bahwa kolaborasi antara twins dan dislokasi adalah kunci di balik peningkatan kekuatan dan plastisitas HEA CrMnFeCoNi secara bersamaan saat menerima beban impak. Paduan ini mengeras dengan sangat efektif di bawah tekanan dinamis

berkat tingginya forest dislokasi dan kemampuan twins yang kuat dalam menghambat pergerakan dislokasi (Qiao et al., 2021).

Pada HEA CrMnFeCoNi dengan stacking fault energy (SFE) rendah telah terbukti meningkatkan kerataan slip (dengan menghambat slip silang) dan twinning deformasi (Wagner et al., 2025). Twinning deformasi merupakan salah satu mekanisme utama yang berperan dalam meningkatkan pengerasan kerja pada paduan, sekaligus membantu menampung deformasi plastis. Selama proses regangan, terbentuknya twinning deformasi secara bertahap memperkecil ukuran butir efektif, sehingga terjadi peningkatan kekuatan melalui efek Hall-Petch dinamis (Wagner et al., 2025). Akibatnya, tingkat pengerasan kerja yang tinggi dapat dipertahankan hingga mencapai regangan seragam yang lebih besar, yang pada gilirannya menghasilkan tegangan tarik ultimit lebih tinggi sebelum terjadinya ketidakstabilan necking. Dengan demikian, mekanisme ini secara signifikan memperbaiki keseimbangan antara kekuatan dan keuletan material (Wagner et al., 2025). Kombinasi unggul antara kekuatan dinamik dan plastisitas ini menjadikan HEA kandidat ideal untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan impak. Karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik beberapa sistem high entropy alloys dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 2. Karakteristik Mikrostruktur dan Sifat Mekanik Beberapa Sistem High Entropy Alloys (HEAs) yang Relevan untuk Aplikasi Lapis Baja

Sistem HEA	Mikrostruktur dominan	Kekuatan luluh (MPa)	Elongasi (%)	Perilaku dinamis	Referensi
TiZrNbTa	Padatan tunggal (BCC), dislocation slip	1200–1600	10–20	Sinergi kekuatan dan keuletan	(Xiang et al., 2023)
TiZrNbV	Larutan Padat tunggal (BCC)	876	20.7	dynamic strain hardening tinggi	(J. Wang et al., 2021)
AlCrFeCoNi	dual-phase kompleks (BCC + FCC)	1250	32,7	Sinergi kekuatan dan keuletan	(Liu et al., 2022)
VNbMoTa	Larutan Padat tunggal (BCC)	811	>25	keuletan yang sangat baik	(M. Wang et al., 2021)
AlCoCeFeNi2.1	FCC+BCC dual phase	1800	6	Kekuatan dinamik tinggi	(George et al., 2020)
HfNbTaTiZr	Larutan Padat tunggal (BCC)	958	20	Sinergi kekuatan dan keuletan	(George et al., 2021)
TiZrNbHfTa	Larutan Padat tunggal (BCC)	1145	8	Kekuatan dinamik tinggi	(George et al., 2021)
TiZrHfNb	Larutan Padat tunggal (BCC)	1300	30	Sinergi kekuatan dan keuletan	(George et al., 2021)
Ni ₂ CoCrFeTi _{0.24} Al _{0.2}	heterogeneous structure	1300	20	Sinergi kekuatan dan keuletan	(He et al., 2021)
NbTaTiV	Larutan Padat tunggal (BCC)	965	50	Solid-solution strengthening	(Liu et al., 2022)
NbTaTiVW	Larutan Padat tunggal (BCC)	1420	20	Kekuatan meningkat dengan strain rate	(Liu et al., 2022)
NbTaVW	Larutan Padat tunggal (BCC)	1530	12	kekuatan dinamis tinggi	(Liu et al., 2022)
Nb ₂₅ Mo ₂₅ Ta ₂₅ W ₂₅	Larutan Padat tunggal (BCC), butiran seragam	2460	16,8	dynamic strain hardening tinggi	(Liu et al., 2022)

Ti8Nb23Mo23Ta 23W23	Larutan Padat tunggal (BCC), distribusi homogen	2377	26,3	dynamic strain hardening tinggi	(Liu et al., 2022)
WNbMoTaV	Larutan Padat tunggal (BCC)	2612	8,8	dynamic strain hardening tinggi	(Liu et al., 2022)
Al0.1CoCrFeNi	struktur butiran heterogen	800-900	53	Sinergi kekuatan dan keuletan	(Luo et al., 2024)

Mekanisme Penyerapan Energi dan Ketahanan Balistik

Perilaku HEAs di bawah kondisi beban dinamis, termasuk benturan balistik, menjadi fokus utama bagi aplikasi proteksi. Kemampuan suatu material untuk menahan penetrasi sangat ditentukan oleh karakteristik mekanisnya, terutama kemampuan dalam mengalami pengerasan regangan dan pengerasan akibat peningkatan laju regangan. Hal ini karena proses penetrasi menimbulkan deformasi geser yang intens dan laju regangan yang sangat tinggi. HEA dengan struktur kubik berpusat muka (FCC) memiliki kemampuan pengerasan regangan yang luar biasa melalui kombinasi beberapa mekanisme, yaitu pengerasan larutan padat, pengerasan akibat twinning, pengerasan dislokasi forest, serta pengerasan yang dipicu oleh deformasi heterogen. Selain itu, HEA menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap laju regangan karena adanya pengurutan jarak pendek kimia yang khas, yang berperan dalam memperlambat pergerakan dislokasi. Lebih jauh, HEA juga memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap terjadinya lokalisasi geser saat mengalami pembebanan dinamis. Oleh sebab itu, material ini menunjukkan ketahanan balistik yang unggul dan memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam sistem perlindungan balistik (Q. Liu et al., 2023).

Penelitian yang dilakukan oleh Tang dan Li (2022) menjelaskan mekanisme penyerapan energi dan ketahanan balistik pada High Entropy Alloys (HEA) dimana pada tahap awal tumbukan antara peluru dan pelat HEA, ikatan atom di daerah kontak mengalami pemutusan total akibat energi kinetik yang sangat tinggi. Pemutusan ini menyebabkan terbentuknya zona dengan struktur tidak teratur yang kemudian berubah menjadi fase amorf. Proses amorfisasi tersebut tidak disebabkan oleh patahan susun, melainkan oleh laju regangan yang sangat besar pada fase awal impak. Fenomena ini konsisten dengan hasil pengamatan eksperimental yang menunjukkan bahwa amorfisasi dapat muncul ketika paduan mengalami deformasi ekstrem atau berada dalam kondisi impak berenergi tinggi. Selama pengujian impak, terbentuknya fase amorf pada HEA mengindikasikan bahwa material ini memiliki ketahanan balistik yang tinggi. Hal ini karena perubahan struktur akibat regangan berupa pembentukan fase amorf alih-alih retakan yang berperan penting dalam meningkatkan ketangguhan material. Dengan demikian, amorfisasi yang diinduksi oleh regangan diidentifikasi sebagai salah satu mekanisme utama yang memperkuat ketangguhan HEA terhadap impak balistik.

Selain itu, energi kinetik peluru yang mengenai pelat HEA turut diserap untuk mengaktifkan pergerakan dislokasi di dalam material. Aktivasi dislokasi ini berkontribusi pada peningkatan kekerasan dan ketangguhan pelat, sehingga memperkuat kemampuannya dalam menahan deformasi akibat impak dan menjaga integritas struktural HEA dari kerusakan yang lebih parah. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa ketahanan HEA terhadap penetrasi peluru tidak semata ditentukan oleh kekerasan, tetapi juga dipengaruhi oleh aktivitas dislokasi yang meningkat pada laju regangan tinggi. Kekuatan ikatan atom yang lebih besar serta kerapatan dislokasi yang lebih tinggi menyebabkan HEA (seperti paduan CrFeCoNi) mengalami pengerasan regangan yang efektif, sehingga memiliki ketangguhan yang baik dalam menghadapi deformasi berkecepatan tinggi (Tang & Li, 2022). Penelitian Liu et al. (2023) menunjukkan bahwa pada uji penetrasi kecepatan 830–2305 m/s, paduan CrMnFeCoNi menunjukkan peningkatan kekerasan lokal hingga ~400 HV pada zona terdampak akibat

akumulasi dislokasi dan twinning. Fenomena ini menurunkan kedalaman penetrasi proyektil secara signifikan dibanding lapis baja konvensional dengan ketebalan sebanding.

Tabel 3. Mekanisme Deformasi HEA pada Beragam Kondisi Kecepatan Impak

Peneliti	Material HEA yang Diteliti	Kecepatan Tumbukan (m/s)	Mekanisme / Struktur Deformasi yang Diamati	Keterangan Tambahan
Muskari dkk. 2020	$\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$	594 – 994	• 594 m/s: pita mikro dan kembaran deformasi • 994 m/s: pita geser adiabatik dan butiran halus hasil rekristalisasi	Struktur deformasi berubah signifikan dengan peningkatan kecepatan impact
Shi dkk. 2022	$\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{20}$	500 – 930	• 500 m/s: kembaran dan pita mikro • 930 m/s: dinding dislokasi padat dan patahan susun	Kepadatan cacat deformasi meningkat seiring peningkatan kecepatan impact
Choudhuri dkk. 2019	Eutektik $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$	803 – 1388	Derajat lokalisasi geser meningkat dengan kenaikan kecepatan impact	Menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap laju regangan dinamis
Chung et al. 2021	$\text{Fe}_{27}\text{Co}_{24}\text{Ni}_{23}\text{Cr}_{26}$	890	• Dekat kawah: dislokasi mendominasi • Jauh dari kawah: kembaran nano mendominasi	Kompleksitas struktur deformasi meningkat akibat tumbukan hiperkecepatan (>2000 m/s)
Liu dkk. 2023	CrMnFeCoNi	830 – 2305	• Kedalaman dan diameter kawah meningkat hampir linear dengan kecepatan impact • Kekerasan puncak (~400 Hv) di dasar dan sisi kawah tetap konstan → menunjukkan saturasi pengerasan akibat penetrasi • Struktur deformasi di sekitar kawah mencakup dislokasi, kembaran (<i>twins</i>), dan pita kink (<i>KBs</i>)	<i>Twins</i> dan <i>KBs</i> berbentuk lensa dengan ukuran bervariasi (kecil-besar) dan orientasi 60° atau 5–50° terhadap bidang deformasi utama
Wang dkk. 2025	$\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{20}$	782-814	• 782 m/s: dislokasi berdensitas tinggi menyebabkan pengerasan kerja, kekuatan luluh paduan meningkat secara signifikan pada berbagai posisi dari dasar kawah, dan <i>twins</i> serta micro-strip memberikan kemampuan pengerasan kerja	kekerasan pada berbagai posisi di sekitar kawah meningkat secara signifikan setelah impact balistik, Terdapat amorfisasi yang nyata di sekitar kawah, dan beberapa patahan susun (SF) serta <i>twins</i> muncul di dasar kawah

Dalam kondisi ekstrem, material yang digunakan harus mampu tidak hanya menahan gelombang kejut dan beban dinamis, tetapi juga memiliki ketahanan terhadap penetrasi proyektil berlapis baja serta kemampuan menyerap energi kinetik besar yang dibawa oleh proyektil maupun energi yang dilepaskan akibat ledakan. Umumnya, kinerja balistik suatu

material meningkat seiring bertambahnya kekuatan material target, karena material dengan kekuatan tinggi dapat menyerap energi proyektil melalui mekanisme deformasi plastis. Temuan-temuan diatas menegaskan bahwa desain HEA untuk aplikasi balistik dan penyerapan energi dapat dioptimalkan melalui pemilihan komposisi elemen dan pengendalian mikrostruktur untuk memaksimalkan mekanisme dislokasi yang terjadi saat tumbukan.

Strategi Desain dan Pemrosesan HEA untuk Lapis Baja

Untuk merancang HEA khusus untuk aplikasi lapis baja, strategi desain harus dimulai dari pemilihan unsur yang menyeimbangkan kekuatan, keuletan, dan kapasitas penyerapan energi. Pilih kombinasi elemen yang menghasilkan fase multiprinsip (mis. matriks BCC atau campuran BCC+FCC) yang diketahui memberikan kombinasi kekuatan-ductilitas baik pada kondisi strain tinggi, tambahkan elemen yang memperkuat melalui pemendekan ukuran butir, fasa presipitasi halus, atau mekanisme penguatan stabil seperti solid-solution strengthening dan elemen yang meningkatkan kemampuan untuk menyerap energi balistik. Simulasi termodinamika (CALPHAD) dan screening komposisi berbasis machine-learning dianjurkan sejak tahap awal untuk mempersempit ruang komposisi terhadap kandidat yang stabil termodinamis, relatif hemat biaya, dan tidak terlalu rentan terhadap segregasi/oksidasi. Pertimbangan biaya industri harus mendorong substitusi elemen strategis mahal dengan alternatif yang lebih murah bila dampak kinerja dapat dikompromikan seminimal mungkin.

Dari sisi mikrostruktur, kendali ukuran butir, distribusi fasa, dan adanya presipitasi/partikel keras sangat krusial. Strategi pemrosesan harus diarahkan untuk menghasilkan mikrostruktur heterogen yang menggabungkan zona keras (untuk hambatan penetrasi) dan zona lebih plastis (untuk disipasi energi) misalnya melalui pengolahan termomekanik bertingkat (severe plastic deformation diikuti rekristalisasi terkontrol) atau pengaturan pendinginan cepat untuk menfiksasi fasa metastabil. Teknik termal pasca-sintesis (aging, annealing terkontrol) dapat digunakan untuk membentuk presipitat halus yang meningkatkan kekuatan tanpa mengorbankan keuletan secara drastis. Penting pula menghindari butiran sangat besar dan segregasi kimiawi yang menurunkan homogenitas mekanik, oleh karena itu proses homogenisasi yang adekuat sebelum konsolidasi diperlukan. Untuk pemrosesan skala prototipe dan produksi, pendekatan berbasis powder metallurgy (atomisasi gas, spark plasma sintering, hot isostatic pressing) menawarkan kontrol mikrostruktur dan densifikasi tinggi dengan lebih sedikit cacat dibanding pengecoran tradisional. Teknik melting (VAC melting, induction melting) diikuti oleh hot forging dan thermomechanical rolling tetap relevan untuk produksi lempeng berskala besar, tetapi perlu kontrol atmosfer/degassing untuk mencegah oksidasi dan inklusi. Metode additif (laser powder bed fusion, directed energy deposition) menjanjikan geometri dan gradien fungsional (graded armor), tetapi memerlukan optimasi parameter cetak agar tidak terjadi porositas dan residu tegangan termal yang merugikan. Integrasi proses seringkali memberikan kombinasi terbaik antara densifikasi, kontrol mikrostruktur, dan sifat mekanik.

Pada level desain sistem lapis baja, pertimbangkan solusi multilapis dan hibridisasi material seperti perpaduan lapisan permukaan keras (keramik atau presipitasi keras dalam HEA) dengan substrat HEA yang lebih duktile dapat meningkatkan tahanan penetrasi dan disipasi energi sekaligus mengurangi kebutuhan akan ketebalan total. Surface engineering (coating PVD/CVD, laser cladding, nitriding) dan laminasi komposit (HEA + seramik/armor composite backing) sangat efektif untuk menyesuaikan fungsi lokal tanpa menaikkan massa berlebih. Selain itu, rancang komposisi dan proses supaya kompatibel dengan proses manufaktur armor existing (punching, welding, joining). Terakhir, kebijakan pengujian dan skalabilitas harus menjadi bagian dari strategi sejak awal: lakukan pengujian mekanik quasi-

statik, uji impact/ballistic berlapis dengan protokol standar (V50, multi-hit), uji fatigue termal, dan analisis micro-mechanisms (SEM/TEM, EBSD) untuk mengaitkan struktur-sifat-performa. Sertakan analisis biaya-manfaat dan supply-chain (ketersediaan elemen, keberlanjutan sumber) serta mitigasi potensi masalah seperti korosi dan sensibilisasi termal. Melalui pendekatan yang terintegrasi, mulai dari perancangan komposisi yang tepat, pengendalian mikrostruktur lewat proses pemrosesan yang sesuai, penerapan konsep multilapis atau material hibrida, hingga pengujian performa yang menyeluruh, material HEA dapat dikembangkan menjadi calon lapis baja yang unggul, baik dalam hal ketahanan balistik maupun kemudahan proses pembuatannya

Analisis Rasio Kekuatan Terhadap Massa High Entropy Alloys Dengan Baja Armor Konvensional

Rasio kekuatan terhadap massa (specific strength) adalah parameter kunci dalam material armor modern sehingga evaluasi terhadap potensi *High Entropy Alloys* (HEAs) untuk aplikasi lapis baja tidak dapat dilepaskan dari aspek kekuatan dan densitas massa yang secara langsung memengaruhi efisiensi perlindungan serta mobilitas kendaraan tempur. High Entropy Alloys (HEA) menawarkan potensi signifikan untuk melampaui baja armor konvensional dalam aspek ini. Sebagai pembanding, baja armor konvensional seperti Armox 500T dan RHA (Rolled Homogeneous Armor) telah digunakan secara luas karena kemudahan fabrikasi dan ketersediaannya. Namun, HEAs menawarkan rasio kekuatan terhadap massa (specific strength) dan ketahanan impak yang lebih tinggi, sehingga memungkinkan pengurangan ketebalan lapisan tanpa menurunkan tingkat perlindungan balistik.

Tabel 4. Perbandingan Rasio Kekuatan Terhadap Massa High Entropy Alloys Dengan Baja Armor Konvensional

Material	Densitas (g/cm ³)	Yield Strength (MPa)	Kekerasan (HV)	Energi Impak (J)	Specific Strength (Mpa.g/cm ⁻³)	Sumber
Ramor 550	7.85	1636	549	71	208	(Bekci et al., 2021)
Ramor 500	7.85	1481	490	40	189	(Bekci et al., 2021)
Armox 500T	7.85	1250	580 ± 40	32	159	(Miloradovic et al., 2025)
RHA Steel	7.83	947 ± 20	291 ± 10	90 ± 7	121	(Singh et al., 2021)
High Strength Steel (As-Rolled)	7.82	858	505	25-37	110	(El-bitar et al., 2017)
AlCuFeMnMgTi	4.34	2443	770	-	563	(Chae et al., 2021)
AlCrFeNiTi0.2	6.83	1499	588	-	219	(Zhang et al., 2024)
Al0.5CoCrCuFeNi aged below 645 °C	7.29	1750	210	-	240	(Tsai et al., 2010)
CoCrFeNiMo	8.5	1998 ± 58	658	-	235	(Sui et al., 2022)
AlTiVCrCu0.4	5.25	959	871	-	183	(K. Liu et al., 2023)
Ti0.8CuCoFeNi	6.5	950	461	-	146	(Ye et al., 2020)
CrMnFeCoNi (Cantor alloy)	7.98	1150 ± 12	1347	-	144	(Xing et al., 2023a)

Al _{0.3} CoCrFeNi	7.37	894 ± 16	180 - 200	-	121	(D. Li et al., 2025)
----------------------------	------	----------	-----------	---	-----	----------------------

Berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel, terlihat perbedaan mencolok antara material High Entropy Alloys (HEAs) dan baja armor konvensional dalam hal kekerasan serta *specific strength* (kekuatan spesifik). Baja armor konvensional seperti Ramor 550, Ramor 500, dan Armox 500T memiliki kekerasan antara 490–580 HV dengan *specific strength* berkisar 159–208 MPa·g/cm³. Nilai ini menunjukkan kombinasi kekuatan dan massa jenis yang cukup baik untuk aplikasi lapis baja konvensional, tetapi masih terbatas oleh densitas tinggi (sekitar 7,8 g/cm³) yang membatasi efisiensi berat. Sebaliknya, HEAs menunjukkan performa yang jauh lebih bervariasi dan dalam beberapa kasus, melampaui baja armor konvensional. Misalnya, paduan berbasis AlCuFeMnMgTi memiliki kekerasan sangat tinggi (770 HV) dengan *specific strength* luar biasa (563 MPa·g/cm³) berkat densitasnya yang rendah (4,34 g/cm³). Paduan lain seperti CoCrFeNiMo, AlCrFeNiTi_{0.2} dan Al_{0.5}CoCrCuFeNi juga menunjukkan kombinasi kekuatan tinggi (1400–2000 MPa) dan *specific strength* yang kompetitif (sekitar 210–240 MPa·g/cm³) mengungguli material baja armor konvensional Ramor 550.

Dari perspektif desain armor modern, perbandingan ini menegaskan bahwa HEAs menawarkan potensi peningkatan signifikan dalam rasio kekuatan terhadap berat tanpa mengorbankan kekerasan. Kekerasan tinggi pada HEAs umumnya berasal dari efek distorsi kisi dan hambatan pergerakan dislokasi akibat konfigurasi multi-elemen, sementara *specific strength* yang tinggi menandakan efisiensi struktural yang lebih baik dalam menahan deformasi dan penetrasi balistik pada massa yang lebih ringan. Dengan demikian, dibandingkan dengan baja armor konvensional yang mengandalkan peningkatan kekuatan melalui perlakuan panas atau paduan tradisional, HEAs membuka peluang pengembangan lapis baja generasi baru dengan performa tinggi dan bobot lebih ringan yang merupakan dua faktor kunci untuk peningkatan mobilitas dan efisiensi energi sistem pertahanan masa depan.

Analisis Tantangan dan Prospek Aplikasi HEAs untuk Armor

HEAs menjanjikan sifat mekanik yang menarik untuk aplikasi anti-balistik dikarenakan kemampuan pengerasan pada laju regangan tinggi, ketahanan spallation, dan kemampuan menyerap energi melalui mekanisme deformasi kompleks (solid-solution strengthening, twinning, dislocation interactions). Beberapa studi eksperimental menunjukkan bahwa HEAs tertentu mempertahankan atau bahkan meningkatkan kombinasi kekuatan-duktilitas pada kondisi laju regangan tinggi yang relevan untuk dampak balistik, sehingga mengurangi kecenderungan shear localization yang merusak. Hal ini menempatkan HEAs sebagai kandidat material struktural untuk pelat armor yang perlu menahan beban dinamis tinggi. Namun tantangan fundamental dimulai dari ruang komposisi dan stabilitas fase dimana desain HEA melibatkan banyak elemen utama sehingga prediksi fase (solid solution vs. intermetallic) dan respon mikrostruktur di bawah laju regangan tinggi masih sulit dimodelkan secara andal. Ketidaktahuan ini membuat optimasi untuk performa balistik menjadi eksperimen-intensif dan mahal dimana setiap perubahan komposisi dapat mengubah mekanisme deformasi yang berdampak besar pada ketahanan penetrasi. Oleh karena itu diperlukan integrasi antara CALPHAD, pemodelan atomistik, dan *machine learning* untuk mereduksi ruang pencarian komposisi dan menargetkan mikrostruktur yang menekan pembentukan fasa rapuh.

Manufaktur dan skala produksi adalah hambatan teknis dan ekonomis besar. Banyak HEA terbaik untuk laju regangan tinggi dikembangkan lewat peleburan vakum, pemrosesan serbuk, atau additive manufacturing (AM) untuk mendapatkan mikrostruktur yang diinginkan dimana masing-masing metode menghadapi tantangan densifikasi, kontrol oksida, segregasi, serta reproducibility pada skala industri. Untuk aplikasi armor secara luas, biaya bahan baku yang

terdiri dari banyak elemen mahal, peralatan produksi yang kompleks, serta kebutuhan pengendalian mutu yang ketat menjadi hambatan utama dalam penerapan komersial. Karena itu, diperlukan strategi untuk menekan biaya, misalnya dengan memilih elemen yang lebih ekonomis, atau menambahkan lapisan pelindung (coating/laminasi) agar ketebalan material HEA murni dapat dikurangi tanpa menurunkan performa. Aspek berat jenis dan lingkungan operasi juga kritis dimana beberapa kelas HEA (terutama refractory HEAs) memiliki densitas tinggi dan/atau masalah oksidasi pada suhu tinggi, yang kurang ideal jika aplikasi menuntut bobot rendah dan ketahanan korosi/oksidasi. Oleh karena itu ada trade-off desain antara memilih HEA refractory untuk performa mekanik ekstrem vs. HEA ringan (Al, Mg-mengandung) yang menuntut rekayasa mikrostruktur untuk menjaga kekuatan balistik tanpa menambah massa.

Dari sisi performa balistik, masih diperlukan standarisasi uji dan pemahaman mekanisme kerusakan multiskala. Uji balistik lengkap, dan characterization pasca-impact (mikroskopi, tomography) harus diintegrasikan untuk mengidentifikasi mode kegagalan (shear plugging, petaling, fragmentation, spall). Juga penting mempelajari perilaku sambungan (welding, bonding pada laminates) dan interaksi HEA dengan komponen lain (backing, komposit serat, lapisan polimer/ceramic) karena solusi armor modern biasanya bersifat hibrid. Tanpa data uji terstandarisasi yang luas, sulit membandingkan HEA dengan baja lapis konvensional atau keramik-komposit pada tingkat sistem. Meski begitu, prospeknya kuat. Kombinasi desain komposisi berbasis data (ML/CALPHAD), *powder metallurgy/Additive Manufacturing (AM)* untuk gradien mikrostruktur, dan arsitektur hibrid (HEA + ceramic/polymer layers) membuka jalan untuk pelat armor yang lebih tipis namun lebih efektif menyerap energi. Kemajuan pada AM dan powder metallurgy juga memungkinkan pembuatan struktur fungsional (graded, architected) yang mengarahkan deformasi dan memitigasi perforation. Di sisi penelitian, fokus pada HEA ringan berkinerja tinggi, penguatan partikel halus, dan kontrol presipitasi skala nano berpotensi menghasilkan generasi HEA yang kompetitif terhadap baja armor dengan keuntungan khusus pada resistansi kelelahan, fluktuasi temperatur, dan multi-ancaman (fragmen + proyektil). Rekomendasi riset terapan jangka dekat sampai menengah: (1) targetkan komposisi HEA yang hemat bobot dan bebas elemen kritis untuk kemudahan skala; (2) lakukan kampanye uji balistik terstandar lengkap (beragam kecepatan dan jenis proyektil) plus micro-to-macro characterization; (3) kembangkan proses AM/powder + post-treatment yang reproducible; dan (4) pelajari solusi hibrid (thin HEA front-plate + backing energy absorber) sebagai jalur komersialisasi awal. Jika tantangan manufaktur dan ekonomi dapat diatasi, HEAs berpotensi menjadi komponen kunci di desain armor generasi berikutnya, bukan sebagai pengganti baja tradisional, melainkan sebagai elemen fungsional dalam sistem lapis hibrid yang dioptimalkan.

KESIMPULAN

Untuk mewujudkan aplikasi nyata sebagai lapis baja, perlu dikembangkan HEA berdensitas lebih rendah, arsitektur berlapis (laminated/graded), serta metode pemrosesan efisien seperti additive manufacturing. Integrasi riset eksperimental dan simulasi multi-skala akan mempercepat desain material dengan kinerja balistik optimal. Dengan kemajuan ini, HEA berpotensi menjadi generasi baru material pertahanan yang unggul dalam ketahanan benturan dan efisiensi massa. Secara keseluruhan, HEAs berpotensi menjadi kandidat utama material armor masa depan yang menggabungkan ketahanan mekanik superior, densitas rendah, dan ketahanan termal tinggi. Tantangan terbesar saat ini terletak pada efisiensi biaya dan optimasi proses sintesis. Dengan kemajuan pesat dalam teknologi manufaktur canggih dan rekayasa material berbasis komputasi, HEAs diproyeksikan akan menjadi komponen kunci dalam

pengembangan lapis baja generasi baru yang ringan, tangguh, dan adaptif terhadap ancaman balistik modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., & Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 990–995. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001>
- Chae, M. J., Sharma, A., Chul, M., & Byungmin, O. (2021). Lightweight AlCuFeMnMgTi High Entropy Alloy with High Strength-to- Density Ratio Processed by Powder Metallurgy. *Metals and Materials International*, 27(4), 629–638. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00823-5>
- Dewangan, S. K., Nagarjuna, C., Lee, H., Rao, K. R., Mohan, M., Jain, R., & Ahn, B. (2024). Advances in Powder Metallurgy for High-Entropy Alloys. *Journal of Powder Materials*, 31(6), 480–492. <https://doi.org/10.4150/jpm.2024.00297>
- El-bitar, T., El-shenawy, E., El-meligy, M., Almosilhy, A., & Dawood, N. (2017). *Development of Armor High Strength Steel (HSS) Martensitic Plates for Troops Carriers*. 879, 489–494. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.489>
- Geantă, V., Voiculescu, I., Stăfănoiu, R., Chereches, T., Zecheru, T., Matache, L., & Rotariu, A. (2018). Dynamic Impact Behaviour of High Entropy Alloys Used in the Military Domain. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012041>
- Gelchinski, B. R., Balyakin, I. A., Yuryev, A. A., & Rempel, A. A. (2022). High-entropy alloys: properties and prospects of application as protective coatings. *Russian Chemical Reviews*, 91(6), RCR5023. <https://doi.org/10.1070/rcr5023>
- George, E. P., Curtin, W. A., & Tasan, C. C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*, 188, 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- He, F., Yang, Z., Liu, S., Chen, D., Lin, W., Yang, T., Wei, D., Wang, Z., Wang, J., & Kai, J. (2021). Strain partitioning enables excellent tensile ductility in precipitated heterogeneous high-entropy alloys with gigapascal yield strength. *International Journal of Plasticity*, 144, 103022.
- Hsu, W.-L., Tsai, C.-W., Yeh, A.-C., & Yeh, J.-W. (2024). Clarifying the four core effects of high-entropy materials. *Nature Reviews Chemistry*, 8(6), 471–485. <https://doi.org/10.1038/s41570-024-00602-5>
- Kononenko, G., Kimstach, T., Safronova, O., Podolsky, R., Puchikov, O., & Klinova, O. (2022). Modern perspective metal materials for armored obstacle (overview). *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-325-342>
- Laplanche, G., Kostka, A., Horst, O. M., Eggeler, G., & George, E. P. (2016). Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 118, 152–163.
- Li, D., Liaw, P. K., Zhang, Y., & Wang, W. (2025). *Materials Science & Engineering A Mechanical behavior of Al x CoCrFeNi high-entropy-alloy rods in a wide temperature range*. 927(December 2024).
- Li, W., Xie, D., Li, D., Zhang, Y., Gao, Y., & Liaw, P. K. (2021). Mechanical behavior of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 118(July 2020), 100777. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100777>

- Liu, F., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2022). Recent Progress with BCC-Structured High-Entropy Alloys. *Metals*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/met12030501>
- Liu, K., Li, X., Wang, J., Zhang, Y., Guo, X., Wu, S., & Yu, H. (2023). *Materials Characterization Investigation of mechanical and corrosion properties of light and high hardness cast AlTiVCrCu 0.4 high entropy alloy.* i(March).
- Liu, Q., Hua, J. Y., Xu, Y. F., Yang, K., Cheng, J. C., Zhang, N. B., Li, C., Cai, Y., & Luo, S. N. (2023). Ballistic penetration of high-entropy CrMnFeCoNi alloy: Experiments and modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 249(January).
- Luo, Z., Feng, T., Li, C., Wan, C., Bai, Q., Wei, J., & Ma, X. (2024). Grain-selective growth makes Al_{0.1}CoCrFeNi high entropy alloys strong and ultra-ductile. *Materials Science and Engineering: A*, 899, 146433.
- Madewu, F. (2025). Strength – Ductility Synergy of Lightweight High Entropy Alloys. *Engineering Reports*.
- Miloradovic, N., Nestorovic, K., Trifkovic, D., & Anicic, A. (2025). *Experimental and numerical examination of perforation of ARMOX 500T high hardness steel plate by projectiles of small arms ammunition.* 182(August).
- Mooraj, S., & Chen, W. (2023). A review on high-throughput development of high-entropy alloys by combinatorial methods. *Journal of Materials Informatics*, 3(1), 4. <https://doi.org/10.20517/jmi.2022.41>
- Muskeri, S., Jannotti, P. A., Schuster, B. E., Lloyd, J. T., & Mukherjee, S. (2022). Ballistic impact response of complex concentrated alloys. *International Journal of Impact Engineering*, 161(November 2021), 104091. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104091>
- Pickering, E. J., & Jones, N. G. (2016). High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects. *International Materials Reviews*, 61(3), 183–202. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1180020>
- Qiao, Y., Chen, Y., Cao, F.-H., Wang, H.-Y., & Dai, L.-H. (2021). Dynamic behavior of CrMnFeCoNi high-entropy alloy in impact tension. *International Journal of Impact Engineering*, 158, 104008.
- Saideep Muskeri. et al. (2021). Excellent ballistic impact resistance of Al_{0.3}CoCrF multi-principal element alloy with unique bimodal microstructure.pdf. *Scientific Report*.
- Singh, B. B., Ashish, G. S., Balaji, P. G., Kumar, K. S., & Arockia, V. M. R. (2021). A Comparative Study on the Ballistic Performance and Failure Mechanisms of High - Nitrogen Steel and RHA Steel Against Tungsten Heavy Alloy Penetrators. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 7(1), 60–80. <https://doi.org/10.1007/s40870-020-00270-8>
- Sui, Q., Wang, Z., Wang, J., Xu, S., Liu, B., Yuan, Q., Zhao, F., Gong, L., & Liu, J. (2022). Additive manufacturing of CoCrFeNiMo eutectic high entropy alloy: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 913.
- Tang, Y., & Li, D. Y. (2022). Dynamic response of high-entropy alloys to ballistic impact. *Science Advances*, 8(32), 1–8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abp9096>
- Tsai, C.-W., Tsai, M.-H., Yeh, J.-W., & Yang, C.-C. (2010). Effect of temperature on mechanical properties of Al_{0.5}CoCrCuFeNi wrought alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 490(1–2), 160–165.
- Ujah, C. O., Kallon, D. V. Von, & Aigbodion, V. S. (2024). High entropy alloys prepared by spark plasma sintering: Mechanical and thermal properties. *Materials Today Sustainability*, 25(December 2023). <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100639>
- Verified Market Report. (2025). *Ballistic Steel Market.* <https://www.verifiedmarketreports.com/product/ballistic-steel-market/>
- Wagner, C., George, E. P., & Laplanche, G. (2025). Effects of grain size and stacking fault energy

- on twinning stresses of single-phase Cr x Mn 20 Fe 20 Co 20 Ni 40- x high-entropy alloys. *Acta Material*, 282(July 2024).
- Wang, J., Bai, S., Tang, Y., Li, S., Liu, X., Jia, J., Ye, Y., & Zhu, L. (2021). Effect of the valence electron concentration on the yield strength of Ti–Zr–Nb–V high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 868, 159190.
- Wang, M., Ma, Z. L., Xu, Z. Q., & Cheng, X. W. (2021). Designing VxNbMoTa refractory high-entropy alloys with improved properties for high-temperature applications. *Scripta Materialia*, 191, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.09.027>
- Wang, Z., Jin, X., Yang, H., Qiao, J., Liaw, P. K., & Wang, Z. (2025). Mechanical behavior and damage mechanisms of Fe40Mn20Cr20Ni20 high entropy alloys under ballistic impacts. *Materials Science and Engineering: A*, 925(January). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147874>
- Wang, Z., & Zhang, S. (2023). Research and Application Progress of High-Entropy Alloys. *Coatings*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/coatings13111916>
- Xiang, T., Zhao, M., Du, P., & Xie, G. (2023). Heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of TiZrNbTa high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 930, 167408.
- Xing, Y., Li, C. J., Mu, Y. K., Jia, Y. D., Song, K. K., Tan, J., Wang, G., Zhang, Z. Q., Yi, J. H., & Eckert, J. (2023a). *Journal of Materials Science & Technology Strengthening and deformation mechanism of high-strength CrMnFeCoNi high entropy alloy prepared by powder metallurgy*. 132, 119–131.
- Xing, Y., Li, C. J., Mu, Y. K., Jia, Y. D., Song, K. K., Tan, J., Wang, G., Zhang, Z. Q., Yi, J. H., & Eckert, J. (2023b). Strengthening and deformation mechanism of high-strength CrMnFeCoNi high entropy alloy prepared by powder metallurgy. *Journal of Materials Science & Technology*, 132, 119–131.
- Ye, X., Wang, T., Xu, Z., Liu, C., Wu, H., Zhao, G., & Fang, D. (2020). Effect of Ti content on microstructure and mechanical properties of CuCoFeNi high-entropy alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(10), 1326–1331.
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H., & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- Zhang, J., Yang, J., Liu, T., Tian, D., Liu, H., Yang, G., Lu, Y., & Shoji, T. (2024). *Microstructure and mechanical properties of Co-free AlCrFeNiTi 0 . 2 eutectic high-entropy alloy*. 33(October), 6688–6700.
- Zhao, S., & Li, Z. (2022). High Entropy Alloys for Extreme Load-Bearing Applications. *Materials Lab*, 1(May), 1–5. <https://doi.org/10.54227/mlab.20220035>