

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Evolusi Cacat Kristal dan Mikrostruktur Baja Armor Akibat Impak Balistik

Crystal Defect Evolution and Microstructural Change in Armor Steel Under Ballistic Impact

Andharu Farhan*, Sovian Aritonang

*Program Studi Matematika Militer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

magnifiumfarhan06@gmail.com*

Abstract

Armor steel is used to resist penetration and absorb impact energy, but performance cannot be judged from hardness or tensile strength alone. Its response also depends on strain rate, temperature, and initial microstructure. This review examines impact loading, crystal-defect evolution, adiabatic shear band (ASB) formation, and microstructural change in Rolled Homogeneous Armor (RHA), High Hardness Armor (HHA), and other high-strength armor steels. A targeted search of publisher websites, DOI records, and institutional repositories selected fifteen publications with verifiable metadata. Evidence from armor steels was distinguished from studies of other steels used for comparison. ASBs may form as deformed or transformed bands and can be associated with sub-boundary rotation, dynamic recrystallization, grain refinement, and crack initiation. In one armor steel, retained-austenite fractions of 2% and 4% under two heat treatments differed by 2 percentage points (100% relative). Grain size increased from 190 nm to 260 nm, a 70 nm change (36.84%) over 9.5 μs; the Hall–Petch grain-size term decreased by 14.51%. Heat treatment and strain-hardening capacity influence ASB susceptibility. Current evidence does not establish universal values for dislocation density, vacancy fraction, temperature rise, or diffusion rate in all RHA steels. Evaluation should combine microstructural characterization, dynamic testing, fractography, and ballistic tests, with complete reporting of composition and heat-treatment conditions.

Keywords: *Armor Steel, Ballistic Impact, Adiabatic Shear Band, Microstructure, High Strain Rate*

Abstrak

Baja armor digunakan untuk menahan penetrasi dan menyerap energi impak, tetapi kinerjanya tidak dapat dinilai hanya dari kekerasan atau kekuatan tarik. Responsnya juga dipengaruhi laju regangan, temperatur, dan mikrostruktur awal. Kajian ini menelaah pembebanan impak, evolusi cacat kristal, pembentukan adiabatic shear band (ASB), dan perubahan mikrostruktur pada Rolled Homogeneous Armor (RHA), High Hardness Armor (HHA), serta baja armor berkekuatan tinggi. Penelusuran terarah melalui laman penerbit, rekaman DOI, dan repositori institusi memilih 15 publikasi dengan metadata terverifikasi. Bukti pada baja armor dibedakan dari penelitian baja lain yang digunakan sebagai pembanding. ASB dapat terbentuk sebagai pita terdeformasi atau tertransformasi dan berkaitan dengan rotasi batas subbutir, rekristalisasi dinamis, penghalusan butir, serta inisiasi retak. Pada satu baja armor, fraksi austenit tertahan 2% dan 4% pada dua perlakuan panas berselisih 2 poin persentase atau 100% secara relatif. Ukuran butir meningkat dari 190 nm menjadi 260 nm, bertambah 70 nm (36,84%) dalam 9,5 μs; suku ukuran butir Hall–Petch turun 14,51%. Perlakuan panas dan kemampuan pengerasan regangan memengaruhi kerentanan ASB. Bukti yang tersedia belum menetapkan nilai universal kerapatan dislokasi, fraksi vacancy, kenaikan temperatur, atau laju difusi pada seluruh RHA. Evaluasi perlu menggabungkan karakterisasi mikrostruktur, pengujian dinamis, fraktografi, dan uji balistik dengan pelaporan komposisi serta kondisi perlakuan panas secara lengkap.

Kata Kunci: Baja Armor, Impak Balistik, Adiabatic Shear Band, Mikrostruktur, Laju Regangan Tinggi

Penulis Korespondensi: Andharu Farhan

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

I. PENDAHULUAN

Baja armor dirancang untuk menahan penetrasi dan membatasi kerusakan ketika menerima proyektil, pecahan, atau bentuk pembebanan dinamis lainnya. Pada kelompok material ini, Rolled Homogeneous Armor (RHA) dan High Hardness Armor (HHA) sering digunakan sebagai rujukan karena keduanya menggabungkan kekuatan tinggi dengan kemampuan menyerap energi. Namun, istilah baja armor mencakup beberapa komposisi dan kondisi perlakuan panas. Karena itu, hasil pengujian satu jenis baja tidak dapat langsung dianggap mewakili seluruh baja armor.

Pada pembebanan cepat, respons material dipengaruhi oleh laju regangan, keadaan tegangan, temperatur, geometri target, serta mikrostruktur awal. Deformasi plastis dapat terkonsentrasi dalam pita geser yang sempit. Jika panas yang dihasilkan selama deformasi tidak sempat terdisipasi ke daerah sekelilingnya, temperatur lokal dapat meningkat dan berkontribusi terhadap pelunakan termal. Interaksi antara pengerasan regangan, sensitivitas laju regangan, dan pelunakan termal dapat membentuk ketidakstabilan deformasi yang dikenal sebagai adiabatic shear band (ASB) (Chakraborty & Roy, 2024; Guan et al., 2024; Karantza & Manolakos, 2023).

Bukti eksperimental pada baja armor memperlihatkan bahwa ASB bukan sekadar konsep teoretis. Jena et al. (2020), misalnya, melaporkan pengujian balistik pada pelat RHA hasil pengecoran kontinu dan menemukan pelepasan material pada permukaan depan yang berkaitan dengan ASB setelah impak. Studi lain pada baja armor berkekuatan tinggi menghubungkan pengujian Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) dengan pengamatan pada spesimen hasil impak balistik, serta membedakan pita terdeformasi dan pita tertransformasi (Jo et al., 2020b). Temuan tersebut memberi dasar untuk membahas evolusi mikrostruktur, tetapi juga menunjukkan bahwa kondisi pengujian perlu disebutkan secara spesifik.

Perlakuan panas merupakan salah satu variabel yang dapat mengubah respons itu. Pada baja armor berkekuatan sangat tinggi, perbedaan antara kondisi quenched-and-tempered dan quenched-and-austempered menghasilkan perbedaan fase penyusun, kemampuan pengerasan regangan, dan kerentanan terhadap ASB (Jo et al., 2020a). Pada HHA, kondisi tempering yang berbeda juga menghasilkan tingkat kemunculan pita geser yang berbeda pada pengujian dinamis (Oliveira et al., 2022). Dengan demikian, pembahasan ASB perlu mempertimbangkan komposisi dan riwayat termal material, bukan hanya laju pembebanan.

Di sisi lain, sejumlah istilah yang sering muncul dalam pembahasan cacat kristal perlu dipisahkan secara cermat. Dislokasi dan vacancy merupakan cacat kisi pada skala atomik, sedangkan mikropori atau microvoid yang diamati melalui fraktografi merupakan bentuk kerusakan pada skala lebih besar. Temuan mengenai peningkatan jumlah void pada permukaan patahan tidak dengan sendirinya membuktikan peningkatan konsentrasi vacancy atomik. Demikian pula, penghalusan butir di dalam ASB tidak otomatis dapat digunakan untuk menghitung kerapatan dislokasi tanpa metode pengukuran yang sesuai.

Berdasarkan persoalan tersebut, artikel ini menyintesis bukti yang tersedia mengenai (1) respons dinamis dan balistik baja RHA/HHA, (2) evolusi ASB dan perubahan mikrostruktur, serta (3) batas bukti mengenai cacat kristal dan kerusakan. Fokus utama diberikan pada penelitian yang menguji baja armor secara langsung. Penelitian pada baja lain hanya digunakan untuk menjelaskan kemungkinan mekanisme dan tidak diperlakukan sebagai hasil eksperimen pada RHA atau HHA.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

II. METODE

Artikel ini disusun sebagai tinjauan literatur terarah. Penelusuran dilakukan pada 15 November 2026 melalui laman penerbit, rekaman DOI, dan repositori institusi yang memuat metadata atau abstrak publikasi. Kata kunci yang digunakan mencakup kombinasi istilah "rolled homogeneous armor", "high hardness armor", "armor steel", "ballistic impact", "adiabatic shear band", "high strain rate", "split Hopkinson pressure bar", "microstructure", dan "fracture". Penelusuran diarahkan untuk menemukan penelitian primer pada baja armor dan sumber tinjauan yang dapat menjelaskan mekanisme ASB.

Publikasi dipertimbangkan apabila (a) identitas judul, penulis, jurnal, tahun, dan DOI dapat dicocokkan pada laman penerbit atau rekaman bibliografis; (b) isi publikasi berkaitan dengan baja RHA/HHA, baja armor berkekuatan tinggi, pengujian impak/dinamis, pembentukan ASB, perubahan mikrostruktur, atau pemodelan respons balistik; dan (c) informasi yang tersedia cukup untuk mengidentifikasi material, pendekatan pengujian, atau temuan utama. Sumber yang hanya memiliki kemiripan kata kunci tanpa hubungan substantif dengan topik tidak dimasukkan.

Sebanyak 15 publikasi dipilih untuk sintesis hasil penelitian dan pembahasan mekanisme. Tiga rujukan teori dasar—Taylor, Hall, dan Petch—dicantumkan secara terpisah untuk mendasari persamaan penguatan dislokasi dan penguatan batas butir, sehingga tidak dihitung sebagai publikasi utama dalam sintesis. Seluruh sumber dianalisis melalui satu kerangka hubungan berantai, yaitu kondisi material dan perlakuan panas, respons terhadap pembebanan dinamis atau balistik, lokalisasi deformasi dan perubahan mikrostruktur, kemudian pembentukan kerusakan. Hasil uji balistik, SHPB, karakterisasi mikrostruktur, fraktografi, dan pemodelan dipadukan untuk menjelaskan tahapan proses tersebut secara utuh. Perhitungan kuantitatif hanya dilakukan pada besaran yang angkanya tersedia secara eksplisit; hasil dari material atau kondisi uji yang berbeda tidak dijumlahkan maupun dirata-ratakan.

Kajian ini bukan systematic literature review (SLR) dan tidak mengklaim mengikuti PRISMA. Penelusuran dilakukan secara terarah, bukan melalui protokol pencarian multi-database yang terdokumentasi lengkap. Catatan jumlah hasil per basis data, penghapusan duplikasi, serta alasan eksklusi pada setiap tahap tidak tersedia. Oleh sebab itu, angka 15 menunjukkan jumlah publikasi yang dipilih untuk pembahasan, bukan estimasi seluruh literatur yang relevan.



Gambar 1. Alur penelusuran dan sintesis literatur terarah.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Hasil dari 15 publikasi yang ditelaah disatukan sebagai satu rangkaian hubungan antara kondisi awal baja, respons ketika menerima pembebanan, perubahan mikrostruktur, dan perkembangan kerusakan. Uji balistik memperlihatkan respons akhir pelat terhadap proyektil, sedangkan pengujian dinamis dan karakterisasi mikrostruktur menjelaskan proses yang terjadi selama deformasi. Fraktografi dan pemodelan melengkapi penjelasan mengenai kerusakan yang terbentuk. Angka yang dihitung di bawah ini merupakan perhitungan ulang dari data yang dilaporkan dalam publikasi, bukan hasil eksperimen baru.

Rangkaian tersebut dimulai dari kondisi mikrostruktur setelah perlakuan panas. Pada baja armor berkekuatan sangat tinggi, kondisi quenched-and-tempered dilaporkan memiliki sekitar 2% austenit tertahan, sedangkan kondisi quenched-and-austempered memiliki sekitar 4%. Selisih absolut dan kenaikan relatif fraksi austenit tertahan dihitung dari kedua nilai tersebut; rumus, substitusi, dan hasil hitungnya dirangkum pada Tabel 1 (Jo et al., 2020a).

$$\Delta f_\gamma = f_\gamma(Q\text{-}A) - f_\gamma(Q\text{-}T) = 4\% - 2\% = 2 \text{ poin persentase}$$
$$\text{Kenaikan relatif} = [(4 - 2) / 2] \times 100\% = 100\%$$

Perhitungan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa fraksi austenit tertahan pada kondisi quenched-and-austempered dua kali nilai pada kondisi quenched-and-tempered, atau meningkat 2 poin persentase dengan kenaikan relatif 100%. Dalam penelitian yang sama, kondisi dengan austenit tertahan lebih tinggi memperlihatkan sensitivitas pembentukan adiabatic shear band (ASB) yang lebih rendah dan regangan kritis pembentukan pita yang lebih tinggi. Hasil ini mengarah pada kesimpulan bahwa jalur perlakuan panas dan susunan fasa ikut menentukan respons terhadap deformasi cepat. Namun, perbedaan tersebut tidak boleh dianggap sebagai akibat austenit tertahan semata karena matriks, tegangan internal antar-fasa, dan kemampuan pengerasan regangan juga berubah bersama perlakuan panas.

Pengaruh perlakuan panas tidak selalu bergerak dalam arah yang sama untuk setiap baja. Pada HHA, spesimen yang ditemper pada 310 °C dilaporkan paling rentan memperlihatkan pita geser dalam kondisi pengujian yang diteliti (Oliveira et al., 2022). Sementara itu, penelitian balistik pada baja armor berkekuatan tinggi menunjukkan bahwa tempering 200 °C memberikan performa terbaik dalam konfigurasi proyektil berinti baja keras dengan kecepatan 840 ± 15 m/s (Jena et al., 2010). Pada penelitian lain dengan pelat armor 25 mm dan proyektil AP 7,62 mm, kenaikan temperatur tempering dari 200 hingga 600 °C diikuti penurunan kekerasan dan peningkatan kedalaman penetrasi. ASB ditemukan pada kondisi tempering hingga 400 °C, tetapi tidak teramati pada 600 °C (Mishra et al., 2012). Dengan demikian, tidak munculnya ASB tidak dapat langsung dianggap sebagai tanda ketahanan penetrasi yang lebih baik; kedalaman penetrasi dan bentuk kerusakan tetap harus diperiksa bersama.

Setelah kondisi awal terbentuk, respons baja ketika menerima beban dipengaruhi oleh laju regangan, temperatur, dan keadaan tegangan. Pada RHA, kenaikan temperatur hingga 300 °C dilaporkan menurunkan tegangan alir dan meningkatkan regangan saat gagal. Sebaliknya, pembebanan pada laju regangan tinggi meningkatkan kekuatan, tetapi menurunkan regangan gagal. Pengujian torsi juga menunjukkan penurunan keuletan yang lebih besar dibandingkan keadaan tegangan lain pada regangan gagal ekuivalen (Whittington et al., 2014). Artinya, kenaikan kekuatan pada pembebanan cepat tidak otomatis berarti material semakin tahan terhadap kerusakan, sebab kemampuan material untuk terus berdeformasi dapat berkurang.

Gambaran tersebut sejalan dengan pengamatan langsung setelah impak. Pada RHA hasil pengecoran kontinu, pelat setebal 30 mm yang menerima proyektil AP berdiameter 30 mm pada kecepatan 460 ± 20 m/s dan sudut impak 0° memperlihatkan pelepasan material pada permukaan depan yang berkaitan dengan ASB (Jena et al., 2020). Nilai kecepatan dari penelitian ini tidak digabungkan dengan kecepatan 840 ± 15 m/s pada penelitian lain karena jenis proyektil dan konfigurasi pengujiannya berbeda. Energi kinetik proyektil juga tidak

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

dihitung karena massa proyektil yang diperlukan untuk persamaan $E = ½mv^2$ tidak tersedia secara seragam dalam data yang disajikan. Oleh sebab itu, perbandingan balistik dalam kajian ini didasarkan pada temuan penetrasi dan kerusakan yang dilaporkan, bukan pada angka energi yang tidak dapat ditentukan.

Selisih ukuran butir, perubahan relatif, dan perubahan rata-rata per interval pengamatan dihitung dari dua ukuran butir yang dilaporkan; rincian substitusi angkanya disajikan pada Tabel 1.

$$\Delta d = d_2 - d_1 = 260 - 190 = 70\ nm$$
$$\text{Perubahan relatif} = (\Delta d / d_1) \times 100\% = (70 / 190) \times 100\% = 36{,}84\%$$
$$\text{Perubahan ukuran rata-rata per waktu} = \Delta d / \Delta t = 70\ nm / 9{,}5\ \mu s = 7{,}37\ nm/\mu s$$

Berdasarkan Tabel 1, ukuran butir bertambah sebesar 70 nm atau 36,84% pada interval pengamatan 9,5 µs, dengan perubahan rata-rata 7,37 nm/µs. Angka terakhir merupakan rasio perubahan ukuran terhadap selang waktu antara dua pengamatan, bukan laju pertumbuhan butir yang diukur secara kontinu. Pengamatan tersebut dikaitkan dengan rotasi batas subbutir dan rekristalisasi dinamis di dalam ASB. Kesimpulan yang dapat diambil adalah bahwa mikrostruktur di zona lokalisasi dapat berubah dalam waktu sangat singkat, tetapi angka ukuran dan laju perubahan ini hanya berlaku untuk material serta kondisi pengujian yang dilaporkan.

Perubahan ukuran butir selanjutnya dapat dibaca melalui hubungan Hall–Petch (Hall, 1951; Petch, 1953). Persamaan ini menyatakan bahwa kontribusi penguatan batas butir berbanding dengan kebalikan akar kuadrat ukuran butir. Dengan menggunakan ukuran 190 nm dan 260 nm yang dilaporkan, faktor ukuran butir $d^{-1/2}$ dihitung sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

$$\sigma_\gamma = \sigma_0 + k_\gamma d^{-1/2}$$
$$I_1 = 1 / \sqrt{(190\ nm)} = 0{,}07255\ nm^{-1/2}$$
$$I_2 = 1 / \sqrt{(260\ nm)} = 0{,}06202\ nm^{-1/2}$$
$$\text{Perubahan relatif} = [(I_2 - I_1) / I_1] \times 100\% = [(0{,}06202 - 0{,}07255) / 0{,}07255] \times 100\% = -14{,}51\%$$

Tabel 1. Rincian perhitungan kuantitatif

Besaran yang dihitung	Rumus dan substitusi angka	Hasil
Selisih austenit tertahan	$\Delta f\gamma = f\gamma$(Q-A) − $f\gamma$(Q-T) = 4% − 2%	2 poin persentase
Kenaikan relatif austenit tertahan	[(4 − 2) / 2] × 100%	100%
Pertambahan ukuran butir	$\Delta d = d_2 - d_1 = 260 - 190$	70 nm
Perubahan relatif ukuran butir	[(260 − 190) / 190] × 100%	36,84%
Perubahan rata-rata per interval	$\Delta d / \Delta t$ = 70 nm / 9,5 µs	7,37 nm/µs
Faktor Hall–Petch pada 190 nm	$I_1 = 1 / \sqrt{190}$	0,07255 $nm^{-1/2}$
Faktor Hall–Petch pada 260 nm	$I_2 = 1 / \sqrt{260}$	0,06202 $nm^{-1/2}$
Perubahan relatif faktor Hall–Petch	[(0,06202 − 0,07255) / 0,07255] × 100%	−14,51% (menurun)

Catatan: Q-T = quenched-and-tempered; Q-A = quenched-and-austempered. Data d_1 = 190 nm, d_2 = 260 nm, dan Δt = 9,5 µs mengacu pada Jo et al. (2020b); seluruh nilai merupakan hasil hitung ulang, bukan pengukuran baru.

2. Pembahasan

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa suku ukuran butir $d^{-1/2}$ berkurang sekitar 14,51% ketika ukuran butir berubah dari 190 nm menjadi 260 nm. Dengan asumsi koefisien Hall–Petch (k_γ) tetap, kontribusi penguatan yang berasal dari ukuran butir menjadi lebih kecil pada ukuran butir yang lebih besar. Kesimpulan ini hanya berlaku untuk suku ukuran butir dalam persamaan, bukan bukti bahwa tegangan luluh total baja turun 14,51%. Tegangan luluh aktual juga dipengaruhi fasa, temperatur, tegangan sisa, dislokasi, dan kerusakan yang terjadi di zona ASB.

Perubahan mikrostruktur tersebut berlangsung bersamaan dengan perkembangan kerusakan. Pada pengujian Charpy RHA, peningkatan laju pembebanan dilaporkan disertai peningkatan jumlah void pada permukaan patahan, tegangan yang lebih tinggi, deformasi plastis yang lebih terbatas, dan penurunan keuletan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

(Gangwar et al., 2024). Void yang terlihat pada permukaan patahan merupakan rongga kerusakan pada skala mikro, sehingga tidak dapat disamakan dengan vacancy, yaitu kekosongan pada situs kisi atom. Studi pada baja bainitik dan AISI 4340 memberi pembanding mengenai perubahan subbutir, rekristalisasi, serta pembentukan retak pada laju regangan tinggi (Duntu & Boakye-Yiadom, 2025; Zhou et al., 2025), tetapi keduanya bukan bukti eksperimen langsung pada RHA atau HHA.

Secara keseluruhan, hubungan antarhasil tidak menunjukkan bahwa satu parameter tunggal menjadi penyebab tunggal kerusakan. Fraksi austenit tertahan yang lebih tinggi pada satu rute perlakuan panas berhubungan dengan sensitivitas ASB yang lebih rendah, tetapi hasil pada HHA menunjukkan bahwa kondisi tempering lain dapat menghasilkan kerentanan ASB yang berbeda. Hal ini menandakan bahwa fase, morfologi matriks, tegangan internal, serta kemampuan pengerasan regangan bekerja secara bersamaan. Ketika pembebanan cepat berlangsung, panas deformasi dapat terakumulasi pada zona sempit; pelunakan lokal kemudian bersaing dengan pengerasan regangan dan memungkinkan geser terlokalisasi. Pada tahap lanjut, pita dapat mengalami transformasi mikrostruktur dan menjadi lokasi inisiasi retak. Data fraktografi RHA memperlihatkan bahwa peningkatan void pada permukaan patahan berlangsung bersama keterbatasan deformasi plastis. Oleh karena itu, ASB, perubahan ukuran butir, dan void lebih tepat dibaca sebagai bagian dari rangkaian deformasi hingga kerusakan, bukan sebagai indikator yang berdiri sendiri (Jo et al., 2020a, 2020b; Oliveira et al., 2022; Karantza & Manolakos, 2023; Gangwar et al., 2024).

Implikasi dari sintesis ini bukan penentuan satu temperatur tempering optimum bagi seluruh baja armor, melainkan perlunya menyebutkan kelas baja dan kondisi pengujian ketika hasil dilaporkan. Perbandingan antarpenelitian perlu mempertimbangkan ketebalan pelat, jenis serta kecepatan proyektil, sudut impak, dan riwayat perlakuan panas. Tanpa informasi tersebut, angka penetrasi maupun kemunculan ASB berisiko dibaca di luar konteks materialnya. Penggabungan uji balistik, pengujian dinamis, dan karakterisasi pasca-impak memberi dasar yang lebih kuat untuk menghubungkan respons makroskopik dengan perubahan mikrostruktur.

Dalam rangkaian ini, pemodelan membantu menjelaskan variabel yang perlu diperhatikan, bukan menggantikan pengukuran. Pemodelan balistik berbasis internal state variable menunjukkan bahwa fraksi void awal, konsentrasi hidrogen dalam kisi, kekerasan, dan ukuran butir dapat memengaruhi respons baja (Peterson et al., 2023). Evaluasi model termoviskoplastik pada RHA juga menekankan perlunya kalibrasi terhadap data material dan kondisi pembebanan yang sesuai (Gangwar et al., 2025). Penguatan yang berkaitan dengan akumulasi dislokasi dapat dijelaskan melalui hubungan Taylor (Taylor, 1934):

$$\Delta\sigma \approx M\,\alpha\,G\,b\,\sqrt{\rho}$$

Pada persamaan tersebut, M adalah faktor Taylor, α merupakan parameter interaksi dislokasi, G modulus geser, b besar vektor Burgers, dan ρ kerapatan dislokasi. Nilai kenaikan tegangan tidak dihitung karena data ρ terukur untuk sampel RHA/HHA pasca-impak tidak tersedia secara seragam.

Kenaikan temperatur akibat kerja plastis dapat dinyatakan secara sederhana sebagai:

$$\Delta T \approx \beta\,\sigma\,\Delta\varepsilon_p / (\rho_m\,C_p)$$

Dalam hubungan ini, β menyatakan fraksi kerja plastis yang berubah menjadi panas, σ tegangan alir, $\Delta\varepsilon_p$ pertambahan regangan plastis, ρ_m massa jenis, dan C_p kapasitas panas spesifik. Kenaikan temperatur lokal tidak dihitung secara numerik karena kurva tegangan-regangan pada laju regangan yang relevan serta parameter termal yang diperlukan tidak dilaporkan secara lengkap. Fraksi vacancy juga tidak ditetapkan sebagai angka karena pengukuran cacat titik yang sesuai tidak tersedia. Pembatasan ini mencegah hasil perhitungan memberi kesan lebih pasti daripada bukti yang tersedia.

Dengan demikian, hasil kuantitatif pada Tabel 1 menunjukkan selisih austenit tertahan sebesar 2 poin persentase atau kenaikan relatif 100% antara dua kondisi perlakuan panas; pertambahan ukuran butir ASB sebesar 70 nm atau 36,84% dalam interval 9,5 μs, setara perubahan rata-rata 7,37 nm/μs; serta penurunan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

14,51% pada suku ukuran butir dalam persamaan Hall–Petch. Ketiga nilai tersebut tidak dijumlahkan menjadi satu indeks karena mewakili besaran fisik yang berbeda dan sebagian berasal dari kondisi material yang berbeda.

Jawaban yang diperoleh dari sintesis ini adalah bahwa ketahanan baja armor terhadap impak tidak dapat ditentukan hanya dari kekerasan, satu kondisi perlakuan panas, atau keberadaan dan ketiadaan ASB. Mikrostruktur awal memengaruhi kemampuan pengerasan regangan; pembebanan cepat mengubah tegangan alir dan regangan gagal; ketidakseimbangan antara pengerasan regangan dan pelunakan termal dapat mendorong lokalisasi; lalu ASB berkembang bersama perubahan butir dan kerusakan mikro hingga berpotensi membentuk retak. Hasil perhitungan Hall–Petch juga menunjukkan bahwa perubahan ukuran butir dapat mengubah kontribusi penguatan batas butir, tetapi tidak cukup untuk menyatakan perubahan kekuatan total tanpa data material lainnya.

Dengan demikian, analisis akhir menunjukkan bahwa baja armor yang baik perlu memiliki keseimbangan antara kekuatan, keuletan, ketangguhan, dan kestabilan mikrostruktur selama menerima pembebanan dinamis. Kondisi tempering 200 °C yang memberikan hasil terbaik pada satu konfigurasi balistik tidak dapat digeneralisasi untuk semua RHA/HHA; demikian pula, tidak ditemukannya ASB pada satu kondisi tidak otomatis menunjukkan penetrasi yang lebih rendah. Penilaian yang utuh harus menghubungkan data balistik dengan respons dinamis, perubahan mikrostruktur, dan bukti kerusakan pasca-impak. Nilai dislokasi, vacancy, dan kenaikan temperatur baru dapat dihitung secara meyakinkan apabila parameter pengukuran yang sesuai tersedia.

IV. KESIMPULAN

Sintesis terpadu memperlihatkan bahwa respons baja armor terhadap impak merupakan hasil interaksi mikrostruktur awal, riwayat perlakuan panas, laju regangan, temperatur, dan keadaan tegangan. Adiabatic shear band (ASB) menjadi salah satu jalur lokalisasi deformasi yang dapat berkembang bersama perubahan butir dan kerusakan mikro, tetapi kemunculan ASB maupun kekerasan awal saja tidak cukup untuk menilai performa balistik. Penilaian baja armor perlu menghubungkan hasil uji balistik dengan respons dinamis serta karakterisasi pasca-impak. Kajian ini juga menunjukkan bahwa bukti kuantitatif mengenai dislokasi dan vacancy pada RHA/HHA masih terbatas. Penelitian lanjutan perlu menggabungkan pengukuran mikrostruktur multi-skala dengan pelaporan komposisi, perlakuan panas, dan kondisi pengujian secara lengkap.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada para peneliti yang publikasinya menjadi dasar sintesis dan pembahasan dalam artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Chakraborty, A., & Roy, S. (2024). Shear localization and shear banding: A review about the complex interplay between material, microstructural and process variables. *Materials Characterization, 218*, 114501. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114501

Duntu, S. H., & Boakye-Yiadom, S. (2025). Microstructural evolution and adiabatic shear band formation in tempered AISI 4340 steel under high strain rate and elevated temperature impact. *Materials Today Communications, 49*, 114059. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.114059

Gangwar, V., Basu, P., Acharyya, S. K., Dhar, S., Chakraborty, S., & Banerjee, A. (2024). Dynamic deformation and fracture surface investigation of rolled homogenous armor steel through Charpy impact testing. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 133*, Article 104592. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104592

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Gangwar, V., Bhattacharjee, S., Acharyya, S. K., Dhar, S., Banerjee, A., & Chakraborty, S. (2025). Evaluating thermoviscoplastic models and failure criteria for rolled homogenous armor steel. *Materials Chemistry and Physics*, Article 130936. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130936

Guan, X., Qu, S., Wang, H., Cao, G., Feng, A., & Chen, D. (2024). Adiabatic shear localization in metallic materials: Review. *Materials, 17*(21), 5365. https://doi.org/10.3390/ma17215365

Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: III. Discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B, 64*(9), 747–753. https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303

Jena, P. K., Mishra, B., RameshBabu, M., Babu, D. A., Singh, A. K., SivaKumar, K., & Bhat, T. B. (2010). Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering, 37*(3), 242–249. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.09.003

Jena, P. K., Manickam, M. A. M., Venketachari, S., Srivastava, S. C., Srivastava, A., Chakrabarty, S., & Kumar, K. S. (2020). Microstructure, mechanical, ballistic property evaluation of RHA steel produced by continuous-casting route. *Journal of Applied Research and Technology, 18*(1). https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2020.18.1.927

Jo, M. C., Kim, S., Suh, D. W., Hong, S. S., Kim, H. K., Sohn, S. S., & Lee, S. (2020a). Effect of tempering conditions on adiabatic shear banding during dynamic compression and ballistic impact tests of ultra-high-strength armor steel. *Materials Science and Engineering: A, 792*, 139818. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139818

Jo, M. C., Kim, S., Kim, D. W., Park, H. K., Hong, S. S., Kim, H. K., Kim, H. S., Sohn, S. S., & Lee, S. (2020b). Understanding of adiabatic shear band evolution during high-strain-rate deformation in high-strength armor steel. *Journal of Alloys and Compounds, 845*, 155540. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155540

Karantza, K. D., & Manolakos, D. E. (2023). A review on the adiabatic shear banding mechanism in metals and alloys considering microstructural characteristics, morphology and fracture. *Metals, 13*(12), 1988. https://doi.org/10.3390/met13121988

Mishra, B., Jena, P. K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T. B., & Gupta, N. K. (2012). Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel. *International Journal of Impact Engineering, 44*, 17–28. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.004

Oliveira, S. A., Monsores, K. G. C., da Silva, A. O., Monteiro, S. N., Paula, A. S., & Weber, R. P. (2022). Adiabatic shear bands produced in a metallic armor, after dynamic compression with a Hopkinson pressure bar. *Journal of Materials Research and Technology, 17*, 2505–2517. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.130

Petch, N. J. (1953). The cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute, 174*, 25–28.

Peterson, L., Horstemeyer, M., Lacy, T., & Moser, R. (2023). Using an internal state variable model framework to investigate the influence of microstructure and mechanical properties on ballistic performance of steel alloys. *Metals, 13*(7), 1285. https://doi.org/10.3390/met13071285

Taylor, G. I. (1934). The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I—Theoretical. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 145*(855), 362–387. https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0106

Whittington, W. R., Oppedal, A. L., Turnage, S., Hammi, Y., Rhee, H., Allison, P. G., Crane, C. K., & Horstemeyer, M. F. (2014). Capturing the effect of temperature, strain rate, and stress state on the plasticity and fracture of rolled homogeneous armor (RHA) steel. *Materials Science and Engineering: A, 594*, 82–88. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.018

Zhou, S., Hu, F., Ke, R., Zheng, H., Wang, Y., Xiang, H., & Wu, K. (2025). Study on the evolution mechanism of adiabatic shear bands during the deformation of medium carbon bainitic steel acted upon by high strain rates. *Journal of Materials Research and Technology, 35*, 4745–4755. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.112