

Studi Perbandingan Penguatan Paduan Al-Mg-0,5Si Melalui Perlakuan Panas T6, T5, dan T8 untuk Aplikasi *Body* Kendaraan Taktis

Absaralita Sabarati¹, Teguh Budiyanto², Venty Lestari³, Muhammad Pasha Arrighi Effendi⁴, Ariq Fakhri⁵, Fauzan Hasan⁶, Bondan T. Sofyan⁷

^{1,7} Departemen Teknologi Daya Gerak, Fakultas Sains dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan RI Kawasan IPSC Sentul, Kec. Citeureup, Kab. Bogor, Jawa Barat, 16810, Indonesia.

^{2,3,4,5,6} Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia Kampus UI, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia.

ARTICLE INFO

Article history:

DOI:

10.30595/pspfs.v9i1.2172

Submitted:

December 11, 2025

Accepted:

January 20, 2026

Published:

February 12, 2026

Keywords:

Al-Mg-Si, T5, T6, T8, hardness

ABSTRACT

Tactical vehicle bodies require materials with high strength, lightweight properties, and resistance to extreme conditions. This study examined the effects of homogenization, deformation, and artificial ageing on the microstructure, hardness, and potential application of Al-Mg-0.5Si (wt.%) alloy as a tactical vehicle body material. Four different treatments were applied: cold deformation + annealing, T6 (precipitation), T5 (hot deformation + precipitation), and T8 (cold deformation + precipitation). The results showed that homogenization at 400 °C for 4 hours increased the secondary dendrite arm spacing (SDAS) by 13–18% and reduced hardness from 54.6–60.7 HRE (as-cast) to 43.2–53.4 HRE (as-homo). After quenching (as-quenched), the highest hardness was observed in the T5 treatment at 98.5 HRE, followed by T8 (87.6 HRE) and T6 (71.8 HRE). Under peak aging conditions, T5 treatment achieved the highest hardness of 51.16 HRB after 18 hours of aging at 180 °C, while T6 and T8 reached 45.98 HRB and 44.6 HRB, respectively. These differences were attributed to a combination of strengthening mechanisms: strain hardening, grain boundary strengthening, and precipitation hardening, with Mg₂Si as the primary precipitate. The Al-Mg-0.5Si alloy with T5 treatment exhibited a higher specific hardness compared to HSLA steel, 18.9 versus 8.5, respectively. With superior mechanical properties and a lighter weight, this alloy showed great potential as a tactical vehicle body material. However, additional tests, such as ballistic and dynamic deformation tests, are necessary for further validation.

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



Corresponding Author:

Bondan T. Sofyan,
Departemen Teknik Metalurgi dan Material,
Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus UI, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia.
Email: bondan.sofyan@idu.ac.id, bondan@eng.ui.ac.id

1. PENDAHULUAN

Kekuatan, keamanan, dan efisiensi merupakan faktor krusial dalam pemilihan material kendaraan taktis (rantis). Material yang digunakan harus ringan namun kuat, sehingga mampu melindungi personel sekaligus meningkatkan mobilitas dan efisiensi bahan bakar [1]. Baja telah lama digunakan sebagai material standar karena kekuatannya, namun densitas tinggi serta kerentanan terhadap korosi membatasi kinerja dan memperbesar biaya operasional [2]. Hal ini mendorong pencarian material alternatif yang lebih ringan namun tetap memiliki kekuatan dan ketahanan yang memadai.

Rantis Maung produksi PT Pindad merupakan contoh rantis modern Indonesia dengan bobot sekitar 2,7 ton, mesin diesel 136 HP, kecepatan maksimum 120 km/jam, dan jarak tempuh hingga 800 km [3]. Untuk mendukung performanya, diperlukan inovasi dalam penggunaan materialnya. Paduan aluminium merupakan salah satu alternatif material substitusi karena memiliki densitas $2,7 \text{ g/cm}^3$ sekitar sepertiga dari densitas baja yaitu $8,83 \text{ g/cm}^3$, serta memiliki ketahanan korosi yang lebih baik [4, 5].

Aluminium tersedia dalam bentuk pengecoran (*cast*) dan penempaan (*wrought*), serta dikategorikan ke dalam sembilan seri berdasarkan jenis paduannya [6]. Dari berbagai jenis, seri 6xxx (Al-Mg-Si) memiliki kemampuan bentuk yang rendah pada suhu kamar, tetapi keuletannya dapat ditingkatkan pada temperatur tinggi melalui proses perlakuan panas seperti pencanaan panas, ekstrusi, dan lain-lain. Paduan ini banyak digunakan pada otomotif dan konstruksi karena ringan, tahan korosi, dan mampu diperkuat melalui perlakuan panas [7, 8]. Dengan penambahan magnesium dapat meningkatkan kekuatan tarik melalui mekanisme *solid solution strengthening*, sedangkan silikon membentuk presipitat Mg_2Si yang meningkatkan kekerasan dan stabilitas dimensi [6].

Peningkatan sifat mekanik paduan Al-Mg-Si umumnya dilakukan melalui *precipitation hardening*. Perlakuan panas T5, T6, dan T8 diketahui mampu memodifikasi mikrostruktur sehingga meningkatkan kekuatan, kekerasan, maupun ketahanan aus. T6 yang terdiri dari perlakuan *solution treatment*, *quenching*, dan *artificial aging*, menghasilkan presipitat Mg_2Si halus yang meningkatkan kekerasan material [9, 10]. T5 dilakukan dengan pendinginan langsung setelah deformasi panas, sedangkan T8 mengombinasikan *solution treatment*, *cold working*, dan *ageing*. Proses T8 meningkatkan densitas dislokasi, yang berperan dalam peningkatan kekuatan dan kekerasan paduan [11, 12].

Beberapa penelitian telah melaporkan perbedaan hasil dari ketiga perlakuan panas tersebut. Özyürek et al. [13] menunjukkan bahwa T6 menghasilkan kekerasan lebih tinggi daripada T5, meskipun ketahanan aus menurun. Mansourinejad & Mirzakhani [11] serta Niranjani et al. [12] menemukan peningkatan kekuatan dan kekerasan melalui T8 dengan deformasi dingin yang lebih besar, namun dengan risiko penurunan keuletan. Zhao et al. [14] menemukan bahwa metode *rolling-quenching* pada temperatur $540 \text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan elongasi tinggi dengan kekuatan setara T6 dan T8. Variasi hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan metode perlakuan panas berpengaruh signifikan terhadap kombinasi sifat mekanik paduan seri 6xxx.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada paduan Al-Mg-0,5Si untuk mengkaji pengaruh perlakuan panas T5, T6, dan T8 terhadap sifat mekaniknya. Tujuannya adalah menentukan metode penguatan paling efektif untuk memenuhi kebutuhan aplikasi body kendaraan taktis, khususnya rantis Maung. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan material yang lebih ringan, kuat, dan efisien bagi kendaraan militer modern.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan empat sampel paduan Al-Mg-0,5Si yang diproses melalui metode *squeeze casting* dengan cetakan logam berukuran $17 \times 17 \times 1,5 \text{ cm}^3$ pada temperatur $850 \text{ }^\circ\text{C}$ dan tekanan 76 MPa selama 10 menit, serta homogenisasi pada temperatur $400 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam. Hasil uji komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectrometry* (OES) menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki komposisi dasar Al-Mg-0,5Si dengan variasi kecil pada kandungan Mg (1,0–1,86%) dan Si (0,51–0,63%) lihat Tabel 1. Variasi tersebut masih dalam batas toleransi pengecoran. Setelah pengecoran, sampel-sampel tersebut diberi perlakuan panas dan deformasi yang berbeda, yaitu :

- Sampel 1 (Deformasi + Anil): Melibatkan proses deformasi 20% diikuti pemanasan pada $550 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam.
- Sampel 2 (T6 / Presipitasi): Melibatkan proses pelarutan pada temperatur $550 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam, diikuti dengan pencelupan cepat pada air temperatur kamar dan penuaan pada temperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 200 jam.
- Sampel 3 (T5 / Deformasi panas + Presipitasi): Melibatkan pelarutan pada temperatur $550 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam, sambil dideformasi 25%, diikuti dengan pencelupan cepat dan penuaan pada temperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 200 jam.
- Sampel 4 (T8 / Deformasi dingin + Presipitasi): Melibatkan pelarutan pada temperatur $550 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam, dilanjutkan dengan pencelupan cepat dan deformasi sebesar 20%. Diikuti dengan pencelupan cepat dan penuaan pada temperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 200 jam.

Karakterisasi meliputi uji kekerasan *Rockwell B* sesuai ASTM E18, pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM-EDS, serta analisis fasa kristalin dengan *X-Ray Diffraction* (XRD). Persiapan sampel pengamatan struktur mikro meliputi pengampelasan, pemolesan menggunakan alumina $0,3 \text{ }\mu\text{m}$ dan pengetsaan sampel dengan zat esta *Keller*, dengan pencampuran 95 mL air, 2,5 mL HNO_3 , 1,5 mL HCl , dan 1 mL HF . Data hasil pengujian digunakan untuk menganalisis pengaruh perlakuan panas dan deformasi terhadap sifat mekanik serta evolusi mikrostruktur paduan.

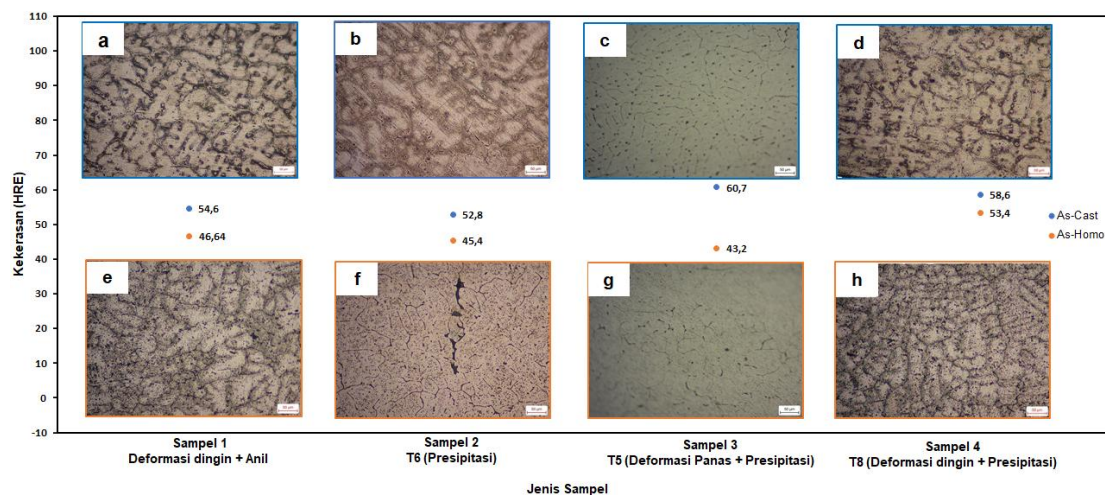
Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Masing-Masing Sampel

Unsur	Sampel 1 (Deformasi dingin + Anil)	Sampel 2 T6 (Presipitasi)	Sampel 3 T5 (Deformasi panas + Presipitasi)	Sampel 4 T8 (Deformasi dingin + Presipitasi)
Mg	1,06	1,01	1,86	1,004
Si	0,633	0,58	0,51	0,545
Fe	0,0652	0,07	0,0849	0,057
Cu	0,0048	0,0049	0,0546	0,004
Mn	0,0035	0,0028	0,0138	0,003
Zn	0,0033	0,0064	0,0199	0,005
Cr	0,0019	0,0017	-	0,001
Ni	0,0029	0,0038	-	0,002
Ti	0,0075	0,0025	0,0098	0,002
Ca	0,0201	-	-	-
Pb	0,0017	-	-	-
Na	-	-	0,0012	-
Ga	-	-	0,0093	-
Al	<i>Balance</i>			

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

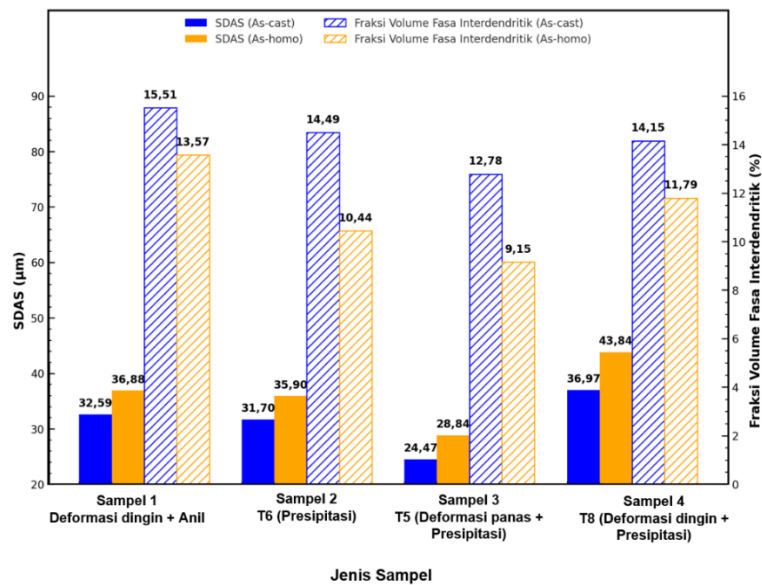
3.1. Analisis Pengaruh Homogenisasi terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat)

Hasil pengamatan struktur mikro dan nilai kekerasan paduan Al-Mg-0,5Si pada kondisi as-cast dan setelah homogenisasi pada temperatur 400 °C selama 4 jam ditunjukkan pada Gambar 1, sementara perubahan ukuran lengan dendrit sekunder (SDAS) dan fraksi fasa interdendritik ditampilkan pada Gambar 2. Pada kondisi as-cast, seluruh sampel memperlihatkan morfologi dendritik dengan fasa interdendritik berupa presipitat Mg_2Si dan $\beta-AlFeSi$. Tidak ditemukan porositas, namun cacat penyusutan akibat perbedaan laju pendinginan masih terlihat. Sampel 3, yang memiliki kadar magnesium lebih tinggi, menunjukkan nilai kekerasan awal tertinggi yaitu 60,7 HRE dengan ukuran SDAS lebih kecil (24,47 μm) dibandingkan sampel lain yang memiliki SDAS lebih besar, yaitu 31,70–36,97 μm dengan kekerasan berkisar antara 52,8–58,6 HRE.



Gambar 1. Perbandingan Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan Paduan Al-Mg-0,5Si pada Kondisi (a-d) Setelah Pengecoran dan (e-h) Setelah Homogenisasi pada Temperatur 400 °C Selama 4 jam.

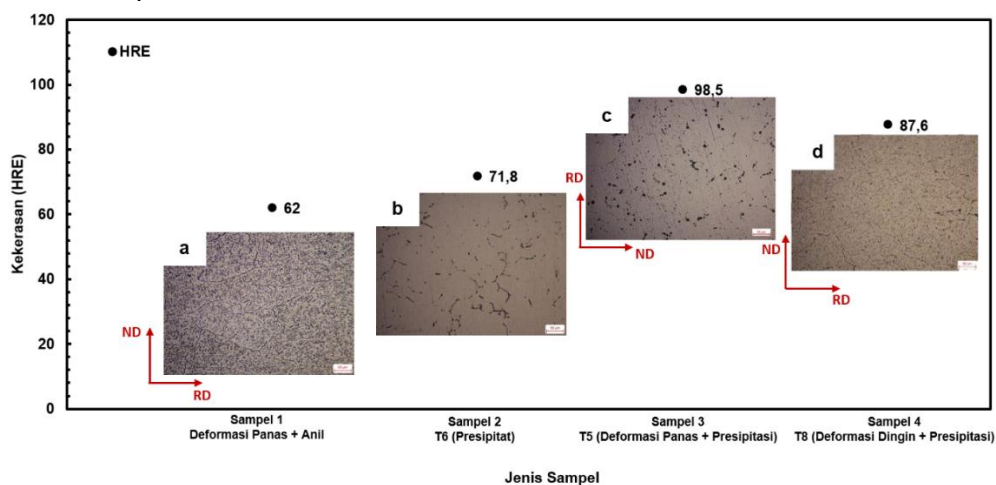
Setelah perlakuan homogenisasi, mikrostruktur menunjukkan pertumbuhan SDAS dan penurunan fraksi volume fasa interdendritik pada seluruh sampel (Gambar 2). Pada Sampel 3, misalnya, SDAS meningkat dari 24,47 μm menjadi 28,84 μm , sementara fraksi fasa interdendritik menurun dari 12,78% menjadi 9,15%. Perubahan ini menandakan bahwa sebagian presipitat Mg_2Si larut ke dalam matriks aluminium, sedangkan fasa $\beta-AlFeSi$ mengalami transformasi menjadi fasa $\alpha-AlFeSi$ yang lebih stabil. Kondisi tersebut berdampak pada penurunan nilai kekerasan di semua sampel. Seperti pada Sampel 3, nilai kekerasan turun dari 60,7 HRE menjadi 43,2 HRE.



Gambar 2. Perbandingan SDAS dan Fraksi Volume Fasa Interdendritik pada ke 4 Sampel Al-Mg-0,5Si Hasil Pengecoran dan Setelah Homogenisasi pada Temperatur 400 °C selama 4 jam.

3.2. Analisis Perbandingan Perlakuan T6, T5, dan T8 Paduan Al-Mg-0,5Si pada Kondisi *As-Quenched*

Proses *quenching* membentuk larutan padat lewat jenuh (SSSS) dengan memerangkap unsur Mg dan Si serta *vacancy*, sekaligus mencegah presipitasi dini Mg_2Si [4]. Kondisi ini menghasilkan struktur metastabil yang sifatnya sangat dipengaruhi oleh perlakuan sebelumnya. Hasil pengamatan pada Gambar 3 menunjukkan variasi struktur mikro dan kekerasan antar sampel.



Gambar 3. Perbandingan Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan Empat Sampel Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat) pada Kondisi Setelah Pencelupan, Dengan Perbesaran 200x. ND : *Normal Direction*, RD : *Rolling Direction*.

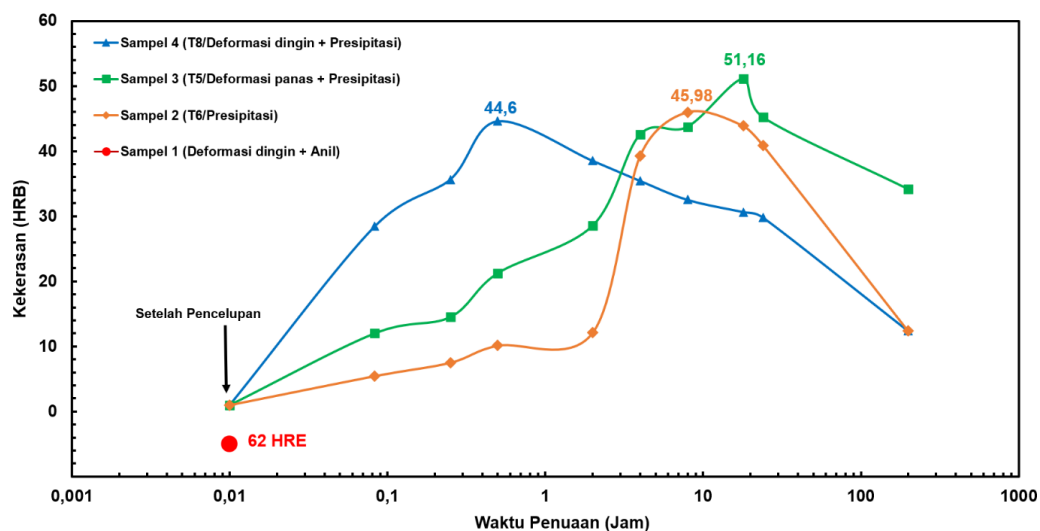
Sampel 1 (deformasi dingin + anil) menunjukkan struktur dendritik terelongasi dengan rasio aspek 2,07 dan kekerasan 62 HRE. Peningkatan kekerasan berasal dari mekanisme strain hardening akibat deformasi plastis, sejalan dengan temuan Alhamidi & Dewi [15]. Sampel 2 (T6) menampilkan butir lebih bulat dengan fraksi fasa interdendritik menurun menjadi 4,58% akibat laku pelarutan, yang mendukung terbentuknya SSSS [16]. Kekerasannya tercatat 71,8 HRE. Sampel 3 (T5) memperlihatkan struktur *equiaxed* dengan batas butir kasar dan bergerigi akibat rekristalisasi dinamis, ukuran butir rata-rata 202,52 µm, dan kekerasan tertinggi 98,5 HRE. Hal ini menunjukkan kontribusi deformasi panas terhadap peningkatan densitas dislokasi dan pembentukan butir baru [17]. Sementara itu, Sampel 4 (T8) menunjukkan dendritik terelongasi signifikan dengan rasio aspek 6,45. Meskipun elongasi besar, kekerasannya hanya 87,6 HRE, lebih rendah dari T5, karena penguatan terbatas dari *strain hardening* tanpa rekristalisasi [18]. Sehingga, perlakuan T5 memberikan kekerasan tertinggi melalui rekristalisasi dinamis akibat deformasi panas, sedangkan T6 dan T8 masing-masing diperkuat oleh pelarutan presipitat dan *strain hardening*.

3.3. Analisis Perbandingan Perlakuan T6, T5, dan T8 pada Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat) dalam Kondisi Penuaan Puncak

Empat sampel paduan Al-Mg-0,5Si dibandingkan pada tahap ini untuk meninjau pengaruh perlakuan T6, T5, dan T8 terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur setelah penuaan buatan. Sampel 1 hanya mengalami homogenisasi dan deformasi dingin 20% tanpa proses larutan, quenching, maupun penuaan, sehingga tidak memiliki kurva penuaan. Sampel 2 (T6) diberi laku pelarutan pada 550 °C selama 1 jam, diikuti quenching dan penuaan pada 180 °C hingga 200 jam. Sampel 3 (T5) mengalami deformasi panas 25% bersamaan dengan laku pelarutan, kemudian quenching dan penuaan pada 180 °C hingga 200 jam. Sampel 4 (T8) diberi deformasi dingin 20% setelah quenching, lalu dilanjutkan penuaan pada 180 °C hingga 200 jam.

3.3.1 Analisis Perbandingan Perlakuan T6, T5, dan T8 terhadap Kurva Penuaan Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat)

Penuaan buatan (*artificial ageing*) bertujuan meningkatkan kekuatan paduan melalui pembentukan presipitat yang mampu menghambat pergerakan dislokasi [4]. Kurva penuaan pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa Sampel 2 (T6), Sampel 3 (T5), dan Sampel 4 (T8) sama-sama mengalami peningkatan kekerasan hingga mencapai kondisi *peak-aged*, sebelum menurun akibat *over-ageing*. Sebagai pembandingan, Sampel 1 tetap pada kekerasan 62 HRE karena tidak mengalami penuaan. Sampel 2 (T6) mencapai kekerasan puncak 45,98 HRB pada 8 jam penuaan, sedangkan Sampel 3 (T5) menunjukkan nilai tertinggi 51,16 HRB pada 18 jam. Sementara itu, Sampel 4 (T8) mencapai puncak lebih cepat, yaitu 44,6 HRB hanya dalam 30 menit. Perbedaan ini mencerminkan mekanisme penguatan yang berbeda. Pada T6, presipitasi terbentuk lebih merata tetapi tanpa kontribusi deformasi tambahan. Pada T5, deformasi panas meningkatkan densitas dislokasi yang berfungsi sebagai situs nukleasi presipitat, sehingga menghasilkan penguatan maksimal [17]. Sebaliknya, pada T8, deformasi dingin mempercepat pencapaian puncak namun menyebabkan presipitat cepat tidak stabil, mempercepat proses *over-ageing* [18].

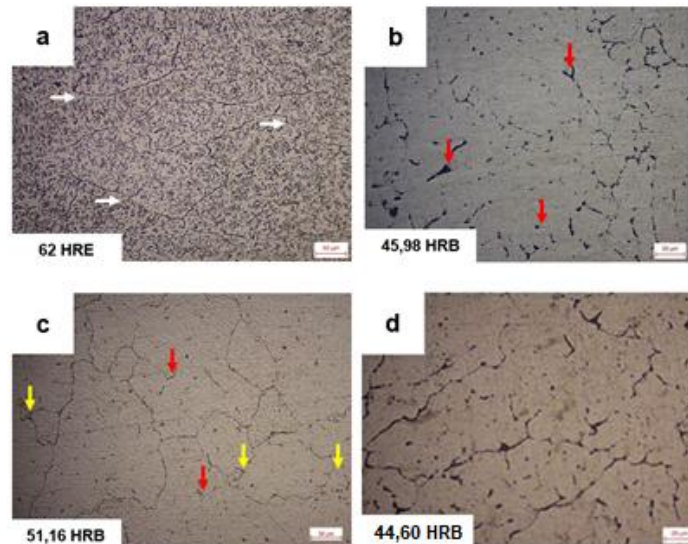


Gambar 4. Pengaruh Perlakuan Terhadap Kurva Penuaan Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat) Setelah Penuaan pada Temperatur 180 °C Hingga 200 jam.

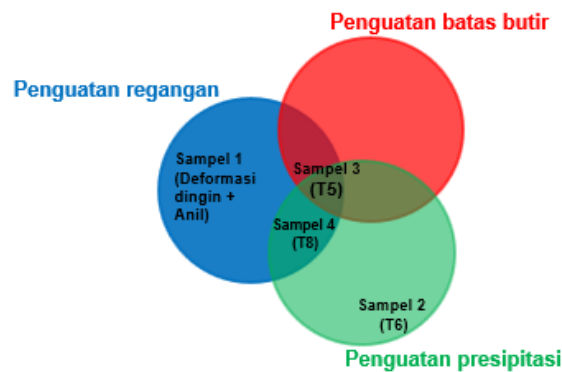
3.3.2 Analisis Perbandingan Struktur Mikro, SEM-EDS, dan XRD Paduan Al-Mg-0,5Si (% berat) Setelah Penuaan Buatan dengan Perlakuan T6, T5, dan T8

Struktur mikro dan nilai kekerasan pada kondisi penuaan puncak ditunjukkan pada Gambar 5. Sebagai pembandingan ditampilkan juga Sampel 1, yang hanya mengalami deformasi dingin 20% dan anil pada 550 °C selama 1 jam tanpa perlakuan pelarutan maupun penuaan buatan. Pada Sampel 1 (Gambar 5a), deformasi dingin 20% menghasilkan slip line dengan kekerasan 62 HRE, yang sepenuhnya berasal dari mekanisme *strain hardening* tanpa kontribusi presipitat [15]. Sampel 2 (Gambar 5b) dengan perlakuan T6 mencapai kekerasan 45,98 HRB setelah 8 jam penuaan, seiring terbentuknya presipitat halus β''/β' yang semikoheren dengan matriks [14]. Pada Sampel 3 (Gambar 5c), perlakuan T5 memicu rekristalisasi dinamis dan presipitasi Mg_2Si , sehingga menghasilkan kekerasan tertinggi 51,16 HRB melalui kombinasi *strain hardening*, *grain boundary strengthening*, dan *precipitation hardening* [17]. Sementara itu, Sampel 4 (Gambar 5d) dengan perlakuan T8 menunjukkan dendrit terelasi dan presipitasi cukup banyak, namun kekerasannya hanya 44,6 HRB, lebih rendah dari T5 karena tidak terjadi rekristalisasi dinamis sehingga kontribusi penguatan batas butir relatif terbatas [18].

Perbedaan mekanisme penguatan yang bekerja pada setiap perlakuan dapat dirangkum pada Gambar 6. Sampel 1 hanya diperkuat oleh *strain hardening*, sedangkan Sampel 2 terutama oleh *precipitation hardening*. Sampel 3 memperoleh penguatan kombinasi melalui *strain hardening*, *grain boundary strengthening*, dan *precipitation hardening*, menjadikannya sampel dengan kekerasan tertinggi. Adapun Sampel 4 menggabungkan *strain hardening* dan *precipitation hardening*. Kombinasi paling lengkap pada Sampel 3 menjelaskan mengapa perlakuan T5 menghasilkan sifat mekanik yang lebih unggul dibandingkan perlakuan lainnya.



Gambar 5. Perbandingan Struktur Mikro dan Kekerasan Paduan Al-Mg-0,5Si (a) Sampel 1 yang dideformasi 20% dan di anil 550 °C selama 1 jam, dan Sampel pada Kondisi Penuaan Puncak pada Temperatur 180 °C, yaitu (b) Sampel 2 Tanpa Deformasi (T6), (c) Sampel 3 Setelah Deformasi Panas 25% (T5), dan (d) Sampel 4 Setelah Deformasi Dingin 20% (T8). Panah putih : *slip line*, Panah Merah : Fasa Kedua, Panah Kuning : Butir Baru.

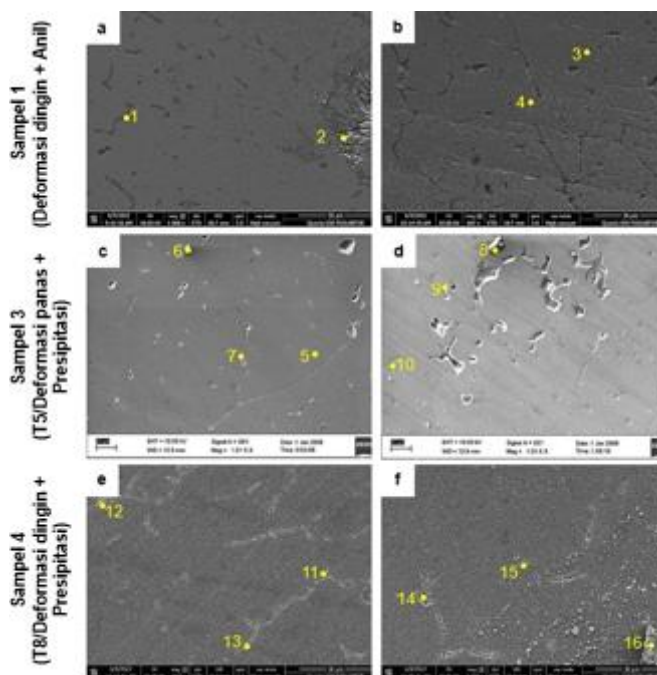


Gambar 6. Mekanisme Penguatan pada Berbagai Perlakuan Sampel.

Pengamatan SEM-EDS pada Gambar 7 dan Tabel 2 menunjukkan distribusi unsur dan fasa yang terbentuk pada tiga sampel, yaitu Sampel 1 (deformasi dingin + anil), Sampel 3 (T5/deformasi panas + presipitasi), dan Sampel 4 (T8/deformasi dingin + presipitasi). Unsur utama yang terdeteksi adalah Al, Mg, Si, dan Fe, sedangkan keberadaan O dan C berasal dari pengotor media poles maupun udara di ruang uji.

Pada Sampel 1 (Gambar 7 a–b), titik analisis EDS menunjukkan matriks α -Al pada titik 1, fasa Al₃FeSi dengan kandungan Fe signifikan pada titik 2, serta fasa Mg₂Si pada titik 3 dan 4. Distribusi fasa ini sesuai dengan perlakuan tanpa penuaan buatan, di mana presipitat terbentuk terbatas dan kekerasan hanya ditopang oleh mekanisme *strain hardening*. Sampel 3 (T5) (Gambar 7 c–d) menunjukkan distribusi presipitat Mg₂Si yang merata. Titik 6–10 pada Tabel 1 mengonfirmasi rasio atomik Mg:Si mendekati 2:1, menandakan presipitat Mg₂Si sebagai fasa dominan. Distribusi ini dipicu oleh deformasi panas yang meningkatkan densitas dislokasi dan mempercepat nukleasi presipitat, sehingga kombinasi *precipitation hardening* dan rekristalisasi dinamis menghasilkan kekerasan yang tinggi. Sampel 4 (T8) (Gambar 7 e–f) juga memperlihatkan presipitat Mg₂Si pada titik 12–14 dan 16, disertai fasa sekunder Al₃FeSi (titik 11) dan Mg₆Si₅ (titik 15). Kehadiran Mg₆Si₅ sebagai fasa stabil dari Mg₂Si mengindikasikan proses penuaan yang lebih lanjut. Namun, distribusi presipitat pada T8 kurang homogen dibanding T5 karena tidak terjadi

rekristalisasi dinamis. Akibatnya, meskipun jumlah presipitat tinggi, kontribusi terhadap kekerasan lebih rendah dibandingkan perlakuan T5.



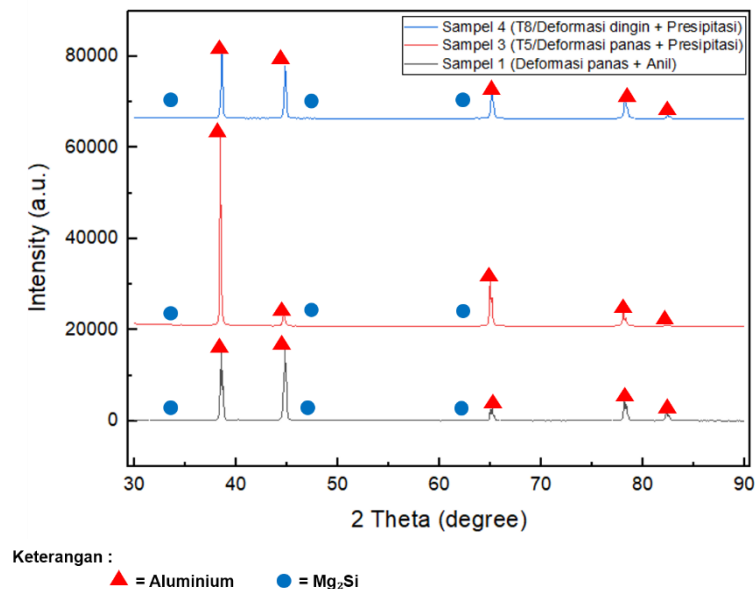
Gambar 7. Struktur Mikro Hasil Observasi SEM pada (a-b) Sampel 1 (Deformasi dingin + Anil) yang Dideformasi 20% dan di anil 550 °C selama 1 jam, dan Sampel Pada Kondisi Penuaan Puncak Pada Temperatur 180 °C, yaitu (c-d) Sampel 3 (T5/Deformasi panas + Presipitasi) Setelah Deformasi Panas 25% (T5), dan (e-f) Sampel 4 (T8/Deformasi dingin + Presipitasi) Setelah Deformasi Dingin 20% (T8). Disertakan pula titik-titik Lokasi Mikro Analisis EDS Yang Hasilnya Ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisis mikro EDS pada Sampel 1, Sampel 3 dan Sampel 4 pada titik sesuai Gambar 7

Jenis Sampel	Titik	Rata-rata kandungan unsur (at. %)					Fasa yang mungkin terbentuk
		Mg	Si	O	Fe	C	
Sampel 1 (Deformasi panas + Anil)	1	0,33	0,01	3,63	-	3,04	Matriks Al
	2	0,34	1,12	11,04	0,35	5,48	Al ₃ FeSi
	3	0,27	0,18	4,85	-	8,35	Mg ₂ Si
	4	0,33	0,22	6,39	-	10,99	Mg ₂ Si
Sampel 3 (T5/Deformasi panas + Presipitasi)	5	1,72	0,43	1,92	-	9,61	Matriks Al
	6	0,34	0,37	20,08	0,05	70,37	Mg ₂ Si
	7	1,66	0,75	3,22	-	17,85	Mg ₂ Si
	8	0,11	0,27	17,33	0,06	79,83	Mg ₂ Si
	9	0,68	0,67	7,48	0,11	58,38	Mg ₂ Si
	10	1,54	0,47	2,74	-	13,25	Mg ₂ Si
Sampel 4 (T8/Deformasi dingin + Presipitasi)	11	1	0,75	5,96	0,06	12,78	Al ₃ FeSi
	12	0,59	0,28	7,59	-	40,41	Mg ₂ Si
	13	0,9	0,48	8,23	-	18,91	Mg ₂ Si
	14	0,64	0,31	10,8	0,01	37	Mg ₂ Si
	15	0,41	0,32	19,46	-	46,78	Mg ₆ Si ₅
	16	0,57	0,36	10,89	-	43,09	Mg ₂ Si

Hasil difraktogram XRD dari tiga sampel, yaitu Sampel 1 (deformasi dingin + anil), Sampel 3 (T5), dan Sampel 4 (T8) di tampilkan pada Gambar 8. Pada Sampel 1, puncak intensitas tinggi teridentifikasi pada matriks α -Al, disertai puncak fasa Mg₂Si pada sudut 2 θ sekitar 34°, 48°, dan 62°, serta fasa berbasis Fe seperti Al₃FeSi dan Al₈Fe₂Si. Kehadiran presipitat Mg₂Si dalam bentuk non-koheren mengindikasikan bahwa perlakuan anil menyebabkan partikel keluar dari larutan padat, sehingga efek penguatan yang dihasilkan relatif terbatas [19]. Sampel 3 (T5) memperlihatkan dominasi matriks α -Al dengan puncak Mg₂Si berintensitas rendah, menandakan presipitat berukuran halus dan terdistribusi merata. Fenomena ini konsisten dengan rekristalisasi dinamis akibat deformasi panas, yang memfasilitasi pembentukan presipitat homogen. Kondisi tersebut menjelaskan tingginya kekerasan Sampel 3 dibandingkan

perlakuan lainnya. Sementara itu, Sampel 4 (T8) juga menunjukkan puncak matriks α -Al disertai fasa Mg_2Si dan $FeAl_3Si$. Jumlah presipitat relatif lebih banyak karena deformasi dingin menghasilkan densitas dislokasi tinggi yang berfungsi sebagai situs nukleasi. Namun distribusinya kurang merata dibandingkan T5, sehingga penguatannya lebih rendah.



Gambar 8. Perbandingan pengujian XRD pada 3 sampel paduan Al-Mg-0,5Si (% berat) yaitu Sampel 1 yang didiformasi 20% dan dianil 550 °C selama 1 jam, Sampel 3 (T5/Deformasi panas + Presipitasi), dan Sampel 4 (T8/Deformasi dingin + Presipitasi).

3.4. Potensi Aplikasi Paduan Al-Mg-0,5Si sebagai Material *Body* Kendaraan Taktis

Tabel 3 menampilkan perbandingan nilai kekerasan keempat sampel pada setiap tahap perlakuan. Data ini menjadi dasar evaluasi potensi paduan Al-Mg-0,5Si sebagai material alternatif *body* kendaraan taktis, yang umumnya menggunakan baja *High Strength Low Alloy* (HSLA). Baja HSLA memiliki kekuatan tarik sekitar 400 MPa [20], yang ekuivalen dengan 115,9 HB atau ≈ 67 HRB [4, 21]. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada Sampel 3 (perlakuan T5) dengan 51,16 HRB. Meski lebih rendah dari baja HSLA, paduan aluminium ini menunjukkan keunggulan pada aspek kekerasan spesifik. Dengan berat jenis baja 7,8 g/cm³, kekerasan spesifiknya adalah 8,5. Sebaliknya, paduan Al-Mg-0,5Si dengan densitas 2,7 g/cm³ menghasilkan kekerasan spesifik 18,9. Hal ini menunjukkan rasio kekuatan terhadap berat yang hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan baja, sehingga mendukung efisiensi bahan bakar dan mobilitas kendaraan.

Selain itu, aluminium memiliki ketahanan korosi yang baik, sesuai standar lingkungan MIL-STD-810G [22], meskipun perlu perhatian khusus terhadap performanya pada suhu tinggi. Dalam konteks perlindungan balistik, standar NATO STANAG 4569 dapat dijadikan acuan untuk uji lanjut [23], mengingat paduan aluminium sering dipadukan dengan keramik atau komposit untuk meningkatkan ketahanan penetrasi.

Secara keseluruhan, perlakuan T5 pada paduan Al-Mg-0,5Si menunjukkan potensi besar sebagai material *body* kendaraan taktis. Kombinasi ringan, tahan korosi, serta rasio kekerasan spesifik yang tinggi menjadikannya material kompetitif terhadap baja HSLA, meskipun uji balistik dan ketahanan lingkungan lanjutan masih perlu diperlukan.

Tabel 3. Perbandingan Nilai Kekerasan Seluruh Sampel pada Setiap Tahap Perlakuan.

Jenis Sampel	Nilai Kekerasan			
	<i>As-Cast</i> (HRE)	<i>As-Homo</i> (HRE)	<i>As-quenched</i> (HRE)	Penuaan (HRB)
Sampel 1 (Deformasi dingin + Anil)	54,6	46,64	62	-
Sampel 2 (T6/Presipitasi)	52,8	45,4	71,8	45,98
Sampel 3 (T5/Deformasi panas + Presipitasi)	60,7	43,2	98,5	51,16
Sampel 4 (T8/Deformasi dingin + Presipitasi)	58,6	53,4	87,6	44,6

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil analisis data dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Perlakuan T5 pada paduan Al-Mg-0,5Si memberikan kekerasan tertinggi, yaitu 98,5 HRE (*as-quenched*) dan 51,16 HRB (puncak penuaan), lebih tinggi dibanding T8 (87,6 HRE & 44,6 HRB) dan T6 (71,8 HRE & 45,98 HRB). Homogenisasi menurunkan kekerasan awal dari 54,6–60,7 HRE menjadi 43,2–53,4 HRE, namun kombinasi deformasi dan presipitasi secara signifikan meningkatkan sifat mekanik paduan.
- b. Dengan kekerasan spesifik 18,9 dibanding baja HSLA 8,5 dan bobot lebih ringan, paduan Al-Mg-0,5Si berpotensi digunakan sebagai material *body* kendaraan taktis, khususnya rantis Maung, meski pengujian tambahan seperti uji balistik dan deformasi dinamis masih diperlukan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan pendanaan dari Hibah Penelitian Program Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemendikristek) dengan nomor kontrak: PKS-531/UN2.RST/HKP.05.00/2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- B. T. Sofyan, Pengantar Material Teknik (2nd ed), Bogor: UNHAN RI Press, 2021.
- S. J. Cimperu, The Mechanical Metallurgy of Armour Steels Executive Summary, Materials Science, Engineering, 2017.
- Pindad, "Rantis Ringan 4x4 Maung," [Online]. Available: <https://pindad.com/ranits-ringan-4x4-maung>. [Accessed 9 September 2025].
- W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering, Global Edition, 10th Edition, New Jersey, USA: Wiley, 2019.
- W. Zhang and J. Xu, "Advanced lightweight materials for Automobiles: A review.," Materials & Design, vol. 221, pp. 1-20, 2022.
- J. Davis, Alloying: Understanding the Basics, Ohio: ASM International, 2001.
- X. H. Fan, "Investigation on strengthening of 6A02 aluminum alloy sheet in hot forming-quenching integrated process with warm forming-dies," Materials Science and Engineering, vol. 587, pp. 221-227, 2013.
- R. Prillhofer, G. Rank, J. Berneder, H. Antrekowitsch, P. J. Uggowitzner and S. Pogatscher, "Property criteria for automotive Al-Mg-Si sheet alloys," Materials, vol. 7, pp. 5047-5068, 2024.
- R. Lumley, Fundamentals of Aluminium Metallurgy, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- J. Dosset and G. E. Totten, ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM International, 2013.
- M. Mansourinejad and B. Mirzakhani, "Influence of sequence of cold working and ageing treatment on mechanical behaviour of 6061 aluminum alloy," Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), vol. 22, no. 9, pp. 2072-2079, 2012.
- V. L. Niranjani, K. C. Hari Kumar and V. Sarma, "Development of high strength Al-Mg-Si AA6061 alloy through cold rolling and ageing," Materials Science and Engineering A, pp. 169-174, 2009.
- D. Özyürek, T. Tuncay and H. Kaya, "The Effects of T5 and T6 Heat Treatments on Wear Behaviour of AA6063 Alloy," High Temperature Materials and Processes, vol. 33, no. 3, pp. 231-237, 2014.
- Q. L. Zhao, T. T. Shan, R. Geng, Y. Zhang, H. He and F. Qiu, "Effect of preheating temperature on the microstructure and tensile properties of 6061 aluminium alloy processed by hot rolling-quenching," Metals, vol. 9, no. 2, pp. 1-8, 2019.
- Alhamidi and M. Dewi, "Microstructural and mechanical properties aa 6061 processed by cold rolling and aging.," VANOS Journal of Mechanical Engineering Education, vol. 3, no. 1, pp. 59-68, 2019.
- Jin, D. Ha and C. Jeong, "Effect of solution treatment on the hardness and tensile properties of AlMgSi alloys for automotive chassis," Materials Transactions, vol. 60, no. 5, pp. 815-823, 2019.
- Y. Z. Wang, "Effects of hot rolling, intermediate annealing and cold rolling on microstructure, texture and mechanical properties of an Al-Mg-Si-Cu alloy," Materials Research Express, vol. 5, no. 10, pp. 1-30, 2018.
- H. Liao, M. Cal, Q. Jing and K. Ding, "Effect of cold-rolling on mechanical properties and microstructure of an Al-12%Si-0.2%Mg alloy," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 20, no. 8, pp. 1364-1369, 2011.
- Masrukan, "Penentuan orientasi fasa kedua Mg₂Si pada paduan AlMgSi1 dengan metoda difraksi elektron," Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II., pp. 251-259, 1996.
- nodsauto.com, "Types of materials used in car body manufacturing," [Online]. Available: <https://nodsauto.com/types-of-materials-used-in-car-body-manufacturing/>. [Accessed 10 Januari 2025].

- Boston, "Hardness Conversion Chart," [Online]. Available: <https://www.bostoncenterless.com/tools/hardness-conversion-chart/>. [Accessed 10 Januari 2025].
- militaryvehicles, "STANAG 4569: Protection Levels for Armored Vehicles," [Online]. Available: <https://militaryvehiclesdata.com/military-dictionary/military-standards/stanag-4569/>. [Accessed 20 Januari 2025].
- o. Defense, "MIL-STD-810H: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," 2025. [Online]. Available: <https://quicksearch.dla.mil/Transient/7091FB5662994488AAE71259C044ECD7.pdf>. [Accessed 20 Januari 2025].