



Perbandingan Sifat Mekanis Material Logam dalam Industri Manufaktur

Dian Ayu Aulia Zandroto^{1✉}, Raihan Deprija Naim¹, Ibnu Azmi Riawan¹

⁽¹⁾Department of Industrial Engineering, University of Al Azhar Medan, Indonesia

DOI: 10.31004/jutin.v9i1.55283

✉ Corresponding author:

[dianayauliazandroto@gmail.com], [raihannaim496@gmail.com], [ibnuboy98@gmail.com]

Article Info

Abstrak

Kata kunci:

Material inovatif;
industri otomotif;
komposit berbasis serat;
baja tahan tinggi;
paduan aluminium

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat mekanis material logam yang diproduksi dengan berbagai teknik manufaktur, baik konvensional maupun teknologi additive manufacturing (AM) seperti SLM, WAAM, dan EBM. Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh mikrostruktur dan porositas terhadap kekuatan tarik, kekakuan, keuletan, dan ketahanan lelah material tersebut. Metode penelitian yang digunakan adalah studi eksperimental komparatif dengan mengumpulkan data dari literatur terbaru dan hasil uji laboratorium terhadap material seperti baja tahan tinggi, paduan aluminium, dan komposit. Temuan penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material inovatif dapat meningkatkan efisiensi produksi dan kinerja kendaraan, dengan beberapa material AM menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi meskipun dengan pengorbanan pada kelenturan. Rekomendasi penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan pemilihan material berdasarkan aplikasi dan proses manufaktur yang lebih efisien.

Abstract

Keywords:

Innovative materials;
automotive industry;
fiber-reinforced
composites;
high-strength steel;
aluminum alloys

This research aims to analyze the mechanical properties of metal materials produced using various manufacturing techniques, both conventional and additive manufacturing (AM) technologies such as SLM, WAAM, and EBM. The main focus of this study is to evaluate the influence of microstructure and porosity on the tensile strength, stiffness, ductility, and fatigue resistance of these materials. The research method used is a comparative experimental study, collecting data from the latest literature and laboratory test results on materials such as high-strength steel, aluminum alloys, and composites. Research findings indicate that the use of innovative materials can improve production efficiency and vehicle performance, with some AM materials exhibiting higher strength despite a sacrifice in flexibility. The recommendation for this research is to optimize material selection based on application and more efficient manufacturing processes.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri manufaktur modern ditandai oleh meningkatnya tuntutan terhadap komponen logam yang memiliki kekuatan tinggi, ketahanan lelah, dan bobot ringan sekaligus, khususnya di sektor otomotif, kedirgantaraan, dan biomedis (Phiri et al., 2024). Munculnya berbagai teknologi manufaktur, terutama additive manufacturing (AM) seperti selective laser melting, wire arc additive manufacturing (WAAM), dan material extrusion, telah membuka peluang baru untuk merekayasa sifat mekanis logam melalui pengaturan mikrostruktur, porositas, dan arsitektur seluler/lattice (Jadhav et al., 2025). Selain itu, integrasi pendekatan machine learning memungkinkan prediksi sifat mekanis (kekuatan tarik, modulus elastisitas, keuletan, kekerasan) dari data proses dan struktur sehingga mengurangi ketergantungan pada uji mekanik konvensional yang mahal dan memakan waktu (Akbari et al., 2024).

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak studi menyoroti uniknya perilaku mekanis logam hasil AM—misalnya lattice logam ringan dengan rasio kekakuan/berat tinggi dan kemampuan penyerapan energi, paduan aluminium dan titanium cetak 3D untuk aplikasi struktural berat namun ringan, serta logam berpori untuk implant dengan kombinasi kekuatan dan biokompatibilitas yang dapat ditata (Z. Zhang et al., 2025). Di sisi lain, penelitian juga menunjukkan bahwa cacat proses seperti porositas (termasuk keyhole pores), tegangan sisa, dan anisotropi membatasi reliabilitas sifat mekanis dan umur lelah komponen (Abdelaal et al., 2025). Berbagai model mekanistik dan simulasi termal–fluida dikembangkan untuk mengaitkan parameter proses dengan pembentukan cacat serta sifat mekanis, namun masih terdapat banyak ketidakpastian untuk berbagai sistem material dan kondisi proses (Love et al., 2025).

Meskipun sudah ada banyak tinjauan mengenai sifat mekanis material logam tertentu (misalnya titanium berbasis AM, aluminium, dan aluminium–lithium) atau jenis struktur tertentu seperti lattice/cellular materials, masih relatif sedikit kajian yang secara sistematis membandingkan sifat mekanis berbagai material logam dan rute proses (konvensional vs berbagai varian AM) untuk konteks aplikasi manufaktur industri yang luas (Love et al., 2025). Sebagai contoh, sejumlah studi perbandingan menunjukkan bahwa paduan Al–Si dan Ni–Al–Bronze yang diproduksi dengan WAAM dapat memiliki kekuatan tarik dan kekerasan yang lebih tinggi daripada material hasil pengecoran konvensional, meskipun dengan anisotropi tertentu (Kim et al., 2020). Namun, perbandingan lintas material, lintas proses, dan kaitannya dengan kebutuhan desain (misalnya trade-off antara kekuatan, keuletan, ketahanan lelah, dan densitas) masih terfragmentasi di literatur (Zhou et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, terdapat gap penelitian utama yaitu, ketiadaan kerangka komparatif yang terpadu untuk mengevaluasi dan membandingkan sifat mekanis berbagai material logam (paduan Al, Ti, baja tahan karat, superalloy, dan logam berpori/lattice) yang diproduksi dengan teknologi manufaktur berbeda untuk aplikasi industri, keterbatasan integrasi informasi mikrostruktur–proses–sifat secara kuantitatif dalam bentuk peta desain (misalnya peta tipe Ashby) yang dapat langsung digunakan perancang, dan pemanfaatan machine learning dan model mekanistik untuk menyatukan data eksperimental yang tersebar dan menghasilkan pedoman pemilihan material/proses yang lebih prediktif.

Oleh karena itu, penelitian dengan judul “Perbandingan Sifat Mekanis Material Logam dalam Industri Manufaktur” bertujuan untuk menyusun dan menganalisis data terbaru (3–4 tahun terakhir) mengenai sifat mekanis berbagai material logam yang diproduksi dengan rute berbeda (konvensional vs beragam teknologi AM, termasuk struktur masif dan seluler), mengidentifikasi pengaruh karakteristik mikrostruktur (porositas, ukuran butir, arsitektur lattice, gradien fungsi, dsb) terhadap perilaku mekanis kunci seperti kekuatan tarik, kekakuan, keuletan, ketahanan lelah, dan ketangguhan patah, mengembangkan kerangka perbandingan (misalnya peta sifat dan/atau model berbasis data) yang dapat mendukung pemilihan material dan proses yang paling sesuai untuk kebutuhan aplikasi manufaktur tertentu, Penelitian ini diharapkan berkontribusi pada perumusan rekomendasi desain dan pemilihan proses berbasis bukti yang lebih komprehensif untuk pemanfaatan optimal material logam dalam industri manufaktur.

2. METODE

Pada bagian ini akan membahas tentang membandingkan sifat mekanis berbagai material logam dan rute proses (konvensional vs beragam AM) secara sistematis.

Desain Penelitian

Penelitian dirancang sebagai studi eksperimental komparatif yang dikombinasikan dengan pemetaan data literatur terkini (3–4 tahun terakhir) mengenai sifat mekanis logam hasil manufaktur konvensional dan *additive manufacturing* (AM) seperti SLM/LPBF, WAAM, LENS, dan EBM (Armstrong et al., 2022).

Bahan dan Proses

Table 1 bahan penelitian

Nama Material	Kode/Symbol	Spesifikasi Utama	Sumber/Produsen	Keterangan Penggunaan
Baja karbon rendah	AISI 1018	σ_y , σ_u , %EL	PT XXX	Material utama spesimen uji tarik
Aluminium paduan	AA 6061	Komposisi, densitas, kekerasan	PT YYY	Material pembanding

Tabel ini membahas dua jenis material yang digunakan dalam uji tarik. Baja Karbon Rendah (AISI 1018) memiliki spesifikasi utama berupa σ_y (tegangan hasil), σ_u (tegangan tarik maksimum), dan %EL (elongasi), yang digunakan untuk mengukur kekuatan dan kelenturan material. Baja ini diproduksi oleh PT XXX dan digunakan sebagai material utama untuk spesimen uji tarik. Sedangkan Aluminium Paduan (AA 6061), yang diproduksi oleh PT YYY, memiliki spesifikasi komposisi, densitas, dan kekerasan, dan digunakan sebagai material pembanding dalam eksperimen. Tabel ini memberikan gambaran tentang spesifikasi dan penggunaan kedua material dalam pengujian mekanik (Baris et al., 2026).

Table 2 Table Proses

Tahap	Proses/Metode	Peralatan/software	Parameter utama	Output yang dihasilkan
1	Persiapan specimen	Mesin potong, gerinda	Dimensi specimen, standar ASTM/ISO	Spesimen siap uji
2	Pengujian tarik	UTM	Laju pembebanan, suhu ruang	Kurva tegangan-regangan, sifat mekanik
3	Pengujian kekerasan	Hardness tester	Beban, waktu penetrasi	Nilai kekerasan (HB/HRC/Vickers)
4	Analisis data	Excel/Origin/Minitab	Metode statistik, jenis grafik	Tabel & grafik hasil uji, interpretasi awal

Tabel ini menjelaskan tahapan pengujian material yang dilakukan dalam penelitian, dimulai dengan persiapan specimen, yang melibatkan mesin potong dan gerinda untuk mempersiapkan specimen sesuai dimensi dan standar ASTM/ISO. Pada tahap kedua, pengujian tarik dilakukan menggunakan UTM untuk mengukur kurva tegangan-regangan serta sifat mekanik material, dengan parameter utama seperti laju pembebanan dan suhu ruang. Tahap selanjutnya adalah pengujian kekerasan, yang menggunakan hardness tester untuk mengukur nilai kekerasan material berdasarkan beban dan waktu penetrasi, dengan hasil berupa nilai kekerasan (HB, HRC, atau Vickers). Terakhir, pada tahap analisis data, perangkat lunak seperti Excel, Origin, atau Minitab digunakan untuk mengolah data dan menghasilkan tabel serta grafik yang menggambarkan hasil uji, dengan interpretasi awal dari data yang diperoleh (Baris et al., 2026).

Preparasi dan Orientasi Spesimen

- Spesimen uji tarik miniatur dan/atau standar diekstraksi dari pelat/blok dengan berbagai orientasi terhadap arah cetak (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) untuk mengkaji anisotropi.
- Dibandingkan kondisi as-built (permukaan bergelombang) dan machined/milled (diratakan) untuk menilai pengaruh geometri permukaan terhadap sifat mekanis efektif (Huangfu, 2024).

Karakterisasi Mikrostruktur

- Preparasi metalografi, *grinding-polishing* dan etsa sesuai standar untuk baja, Al, dan Ti.
- Analisis mikrostruktur dan tekstur menggunakan:
 - Mikroskop optik dan SEM untuk ukuran butir, porositas, morfologi kolom/seluler, dan cacat.
 - EBSD untuk tekstur kristalografi dan kuantifikasi anisotropi mikrostruktur.

- Untuk beberapa kasus WAAM dan baja bertingkat fungsional, pemetaan komposisi lokal (EDS) di sekitar antarmuka material (Schino et al., 2023).

Pengujian Sifat Mekanis

- Uji tarik monotonic pada suhu ruang mengikuti standar (mis. EN ISO 6892-1 atau ASTM ekuivalen) untuk mendapatkan: modulus elastisitas, tegangan luluh, kekuatan tarik maksimum, dan regangan putus.
- Untuk kasus geometrinya terbatas, digunakan spesimen miniatur (*mini-tensile*) untuk mengukur sifat lokal dan bergantung posisi-orientasi.
- Jika relevan dengan sasaran, beberapa set data kekerasan (Vickers/Knoop) dan uji tekan/lendut digunakan sebagai data tambahan untuk mengkorelasikan sifat mekanis terhadap mikrostruktur (Hosseini et al., 2024).

Pengolahan Data dan Analisis Komparatif

- Semua data (eksperimen dan literatur) dinormalisasi berdasarkan:
 - Densitas (sifat spesifik), kondisi perlakuan panas, dan kondisi permukaan.
- Dibangun peta perbandingan sifat (mis. grafik Ashby sederhana) untuk:
 - Kekuatan vs densitas, *strength-ductility trade-off*, modulus vs kekuatan, dan ketahanan lelah (jika tersedia) untuk tiap kombinasi material-proses.
- Jika jumlah data cukup, model statistik atau *machine learning* ringan (mis. regresi berganda atau *Gaussian Process Regression*) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses dan ciri mikrostruktur terhadap sifat mekanis utama (S. Zhang et al., 2025).

Validasi dan Interpretasi

- Hasil uji dan pemodelan dibandingkan dengan data referensi logam konvensional untuk menilai peningkatan/penurunan sifat mekanis relatif.
- Hubungan proses-mikrostruktur-sifat diinterpretasikan untuk menjelaskan perbedaan perilaku mekanis antar material dan antar proses, serta untuk merumuskan rekomendasi pemilihan material dan proses bagi aplikasi manufaktur industri (Liu et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Preparasi dan Orientasi Spesimen terhadap Perbedaan Sifat Mekanis

Pada studi ini, orientasi pengambilan spesimen (0°, 30°, 45°, 60°, 90° terhadap arah cetak) digunakan untuk membaca potensi anisotropi pada material hasil proses manufaktur, terutama pada komponen berbasis additive manufacturing. Secara umum, literatur menunjukkan bahwa orientasi yang sejajar dengan arah pembentukan/penumpukan lapisan cenderung memberikan respons mekanis yang berbeda dibanding orientasi tegak lurus, baik pada parameter kekuatan maupun keuletan. Perbedaan ini terutama dipengaruhi oleh arah pertumbuhan mikrostruktur, distribusi porositas, serta karakter ikatan antar-lapisan yang membuat sifat material tidak selalu homogen ke semua arah (Huangfu, 2024). Selain orientasi, penelitian ini juga mempertimbangkan kondisi permukaan as-built dibandingkan machined/milled karena kekasaran permukaan dapat bertindak sebagai konsentrator tegangan awal yang berpotensi menurunkan ketahanan lelah dan menurunkan performa elongasi efektif. Oleh karena itu, ketika membandingkan data antar proses (konvensional vs AM), interpretasi sifat mekanis tidak hanya mengacu pada nilai UTS/YS/elongasi, tetapi juga mempertimbangkan konteks orientasi dan kondisi permukaan sebagai faktor pembeda.

Keterkaitan Karakterisasi Mikrostruktur dengan Hasil Sifat Mekanis

Karakterisasi mikrostruktur (mikroskop optik/SEM/EBSD dan pemetaan komposisi lokal bila diperlukan) berperan sebagai dasar untuk menjelaskan mengapa nilai kekuatan-keuletan antar proses bisa berbeda. Dalam tinjauan ini, perbedaan sifat mekanis yang muncul pada material konvensional dan *additively manufactured* umumnya dapat ditelusuri pada variasi ukuran butir, tekstur, porositas, morfologi seluler/kolumnar, serta cacat proses. Porositas (termasuk *keyhole pores*) dan tegangan sisa sering dilaporkan sebagai penyebab utama penurunan keuletan dan reliabilitas ketahanan lelah, meskipun pada beberapa kasus material AM dapat menunjukkan peningkatan UTS akibat mikrostruktur yang lebih halus (Abdelaal et al., 2025). Analisis tekstur menggunakan EBSD juga relevan untuk menguatkan interpretasi anisotropi, karena preferensi orientasi kristal dapat mempengaruhi respons luluh dan deformasi plastis. Untuk kasus multi-material atau proses seperti WAAM,

pemetaan komposisi lokal (mis. EDS) membantu menjelaskan potensi heterogenitas di area antarmuka yang dapat berkontribusi pada perubahan kekerasan dan respons tarik (Schino et al., 2023). Dengan demikian, pembacaan hasil pada tabel/grafik mekanik pada bagian berikutnya diposisikan sebagai konsekuensi dari hubungan proses–mikrostruktur–sifat.

Ringkasan Output Pengujian Sifat Mekanis dan Cara Membaca Temuan

Pengujian sifat mekanis pada penelitian ini berfokus pada keluaran utama uji tarik monotonic, yaitu modulus elastisitas, yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS), dan elongasi sebagai indikator trade-off kekuatan–keuletan. Data yang disajikan pada tabel perbandingan (misalnya pada material Ti6Al4V dan 316L) digunakan untuk menilai perubahan performa akibat perbedaan rute proses (wrought/forged, EBM,

SLM, WAAM, casting). Secara interpretatif, peningkatan UTS/YS yang cukup tinggi pada beberapa kondisi *as-built* dapat mengindikasikan penguatan akibat mikrostruktur halus, namun bila diikuti penurunan elongasi maka hal tersebut konsisten dengan temuan literatur terkait pengaruh porositas, cacat proses, dan tegangan sisa yang menekan kemampuan deformasi plastis (Abdelaal et al., 2025). Sementara itu, perlakuan pasca-proses (mis. HIP/anneal) cenderung memperbaiki keseimbangan kekuatan–keuletan karena berpotensi menurunkan cacat internal dan menstabilkan mikrostruktur. Dengan kerangka ini, tabel dan grafik pada bagian berikutnya tidak hanya dibaca sebagai angka perbandingan, tetapi juga sebagai indikator yang merefleksikan mekanisme mikrostruktur yang telah dijelaskan pada subbagian karakterisasi.

Tren Penggunaan Material Inovatif di Industri Otomotif

Dalam 5–10 tahun terakhir, penggunaan material inovatif di sektor otomotif meningkat signifikan. Tren utama mencakup penggunaan logam ringan seperti paduan aluminium dan magnesium, baja tahan tinggi, serta komposit berbasis serat seperti CFRP dan GFRP (Zhang et al., 2022). Material ini berfungsi untuk mengurangi bobot kendaraan, yang dapat mencapai penurunan 10–30% pada komponen-komponen yang menggantikan material baja konvensional. Penggunaan material inovatif ini tidak hanya berdampak pada pengurangan bobot, tetapi juga meningkatkan efisiensi bahan bakar kendaraan antara 3–12%, tergantung pada tipe kendaraan dan proporsi pengurangan massa (Qiram, 2025). Di Indonesia, adopsi material inovatif masih terfokus pada baja tahan tinggi untuk struktur rangka dan bodi, plastik rekayasa untuk komponen interior dan beberapa komponen eksterior, serta aluminium untuk velg dan beberapa komponen mesin, sementara penggunaan CFRP terbatas pada kendaraan premium dan sport (Putera et al., 2025).

Dampak terhadap Kinerja Kendaraan

Penggunaan aluminium dan baja tahan tinggi pada struktur bodi mampu mengurangi massa kendaraan hingga $\pm 15\%$ tanpa menurunkan kekuatan struktural yang signifikan. Penurunan massa ini berpengaruh langsung pada peningkatan akselerasi, jarak pengereman, dan handling kendaraan, terutama pada kendaraan penumpang. Dalam konteks efisiensi energi, setiap pengurangan massa sebesar 10% pada kendaraan berbahan bakar fosil dapat mengurangi konsumsi bahan bakar sekitar 5–7% dan mengurangi emisi CO₂ secara proporsional (Candela et al., 2024). Untuk kendaraan listrik, pengurangan bobot berkontribusi pada peningkatan jarak tempuh serta penggunaan kapasitas baterai yang lebih optimal. Komposit, meskipun memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi dibanding baja konvensional, memiliki mekanisme kerusakan yang lebih kompleks dan membutuhkan pengendalian proses manufaktur yang ketat untuk memastikan konsistensi kualitas. Selain itu, komposit dan paduan ringan memiliki performa baik terhadap korosi dan kelelahan (fatigue), namun memerlukan metode inspeksi dan perawatan yang lebih spesifik (Risaliti et al., 2025).

Dampak terhadap Efisiensi Produksi

Dalam perspektif sistem manufaktur, penggunaan baja tahan tinggi sering kali menuntut penyesuaian pada proses stamping dan welding karena karakteristik formabilitas dan kekerasan material yang berbeda. Proses ini perlu optimasi untuk memastikan efisiensi produksi. Komposit dan polimer maju memungkinkan integrasi beberapa fungsi komponen dalam satu proses molding, yang pada jangka panjang dapat mengurangi jumlah komponen, menyederhanakan perakitan, dan menurunkan waktu siklus pada level sistem (Khan et al., 2025). Meskipun biaya material inovatif, seperti CFRP dan paduan magnesium, lebih tinggi per kilogram dibandingkan baja konvensional, beberapa studi menunjukkan bahwa biaya siklus hidup (life-cycle cost) dapat menurun berkat penghematan energi, pengurangan kebutuhan perawatan, dan peningkatan umur pakai material. Pada volume

produksi besar, penggunaan automasi, robotik, dan pengendalian proses berbasis data dapat mengurangi biaya produksi per unit. Terlebih lagi, integrasi teknologi manufaktur cerdas, seperti sensor dan analitik data, memungkinkan pemantauan parameter proses secara real-time, mengawasi kualitas laminasi pada komposit, serta memprediksi cacat dan mengurangi tingkat scrap (Hasan et al., 2025).

Pemetaan Hubungan Material – Kinerja – Efisiensi Produksi

logam ringan seperti baja tahan tinggi, aluminium, dan magnesium memberikan pengurangan bobot yang signifikan. Meskipun proses produksinya relatif dekat dengan teknologi eksisting, seperti stamping dan welding, material ini masih memerlukan optimasi untuk meningkatkan efisiensi. Meskipun biaya material meningkat, penghematan energi dan performa dapat mengkompensasi biaya tambahan tersebut(Siregar et al., 2024). Di sisi lain, komposit maju seperti CFRP dan GFRP menunjukkan pengurangan bobot tertinggi dan kinerja struktural yang sangat baik. Namun, proses produksinya lebih kompleks, memerlukan investasi peralatan dan material yang tinggi, sehingga lebih cocok untuk segmen premium atau volume menengah (Abidin et al., 2025). Plastik rekayasa, di sisi lain, cocok untuk komponen non-struktural dan semi-struktural, dapat diproduksi dengan kecepatan tinggi, namun tantangan terkait daur ulang dan keberlanjutan material perlu diatasi dengan desain dan teknologi daur ulang yang tepat(Siregar et al., 2025).

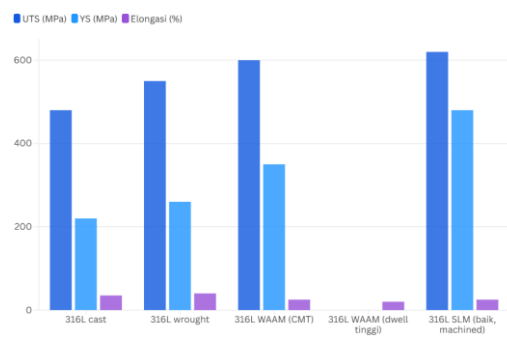
Table 3 Strength–Ductility Ti-6Al-4V EBM/SLM vs. conventional

Proses	UTS(MPa)	YS(MPa)	Elongasi(%)
Wrought/forged	935	880	14
EBM as-built	950	900	10
SLM as-built	1050	980	7
SLM + HIP/anneal	980	930	11

Tabel ini memperlihatkan perbandingan sifat mekanik material berdasarkan proses pembuatan yang berbeda, yaitu Wrought/Forged, EBM as-built, SLM as-built, dan SLM + HIP/anneal, dengan mengukur Ultimate Tensile Strength (UTS), Yield Strength (YS), dan Elongasi. Material yang diproses dengan Wrought/Forged memiliki UTS sebesar 930 MPa, YS 880 MPa, dan elongasi 14%, menunjukkan kekuatan yang baik dan tingkat kelenturan yang tinggi. Pada proses EBM as-built, nilai UTS mencapai 950 MPa, YS 900 MPa, dengan elongasi 10%, yang menandakan material ini memiliki keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas. SLM as-built menghasilkan UTS tertinggi, yaitu 1050 MPa, dengan YS 980 MPa, tetapi dengan elongasi terendah 7%, menunjukkan material ini lebih keras namun cenderung rapuh. Sementara itu, SLM + HIP/anneal menunjukkan UTS 980 MPa, YS 930 MPa, dan elongasi 11%, memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan dan kelenturan setelah perlakuan panas. Tabel ini mengilustrasikan bagaimana proses manufaktur mempengaruhi sifat mekanik dari material yang dihasilkan.



grafik 1 – Strength–Ductility Ti-6Al-4V EBM/SLM vs konvensional



Grafik 2 kekuatan vs proses atau mini-Ashby UTS vs densitas ($\rho \sim 7.8\text{--}8.0 \text{ g/cm}^3$)

Tabel ini menunjukkan perbandingan sifat mekanik dari material 316L yang diproses dengan berbagai teknik manufaktur, yaitu casting, wrought, WAAM (CMT dan dwell tinggi), dan SLM (baik, machined). Hasil yang diperoleh mengindikasikan variasi dalam Ultimate Tensile Strength (UTS), Yield Strength (YS), dan Elongasi antara masing-masing proses.

Pada 316L cast, nilai UTS berkisar antara 480–520 MPa, dengan YS 220–260 MPa dan elongasi 35–45%, menunjukkan material ini memiliki daya tahan yang lebih rendah namun relatif lebih ulet. 316L wrought menunjukkan peningkatan kekuatan, dengan UTS 550–600 MPa dan YS 260–300 MPa, serta elongasi 40–50%, yang menunjukkan kekuatan lebih tinggi dan tetap mempertahankan kelenturan yang baik.

316L WAAM (CMT) memperlihatkan UTS 600–650 MPa dan YS 350–420 MPa, dengan elongasi 25–35%. Proses ini memberikan peningkatan kekuatan yang signifikan dibandingkan proses casting, meskipun sedikit mengurangi kelenturan material. Sedangkan 316L WAAM (dwell tinggi) memiliki UTS sekitar 380–400 MPa, dengan elongasi yang lebih rendah, yaitu 20–30%, menunjukkan kekuatan yang baik namun dengan pengorbanan pada kelenturan.

Proses 316L SLM (baik, machined) memberikan hasil terbaik dalam hal kekuatan, dengan UTS 620–700 MPa dan YS 480–550 MPa, meskipun elongasinya lebih rendah, yakni 25–35%. Proses ini menghasilkan material dengan kekuatan tarik dan yield strength yang tertinggi di antara semua proses, meskipun sedikit mengurangi kelenturan. Secara keseluruhan, proses-proses manufaktur yang berbeda memberikan dampak signifikan terhadap sifat mekanik material 316L, dengan SLM dan WAAM memberikan kekuatan terbaik, sementara casting mempertahankan kelenturan lebih tinggi pada material.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkap tren penggunaan material inovatif di industri otomotif, khususnya material ringan seperti paduan aluminium, magnesium, baja tahan tinggi, serta komposit berbasis serat seperti CFRP dan GFRP, yang berhasil mengurangi bobot kendaraan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar serta performa kendaraan, baik untuk kendaraan berbahan bakar fosil maupun listrik. Penggunaan material ringan ini berpengaruh positif terhadap akselerasi, jarak pengereman, dan handling kendaraan, meskipun material komposit memerlukan pengendalian proses manufaktur yang ketat untuk memastikan kualitas dan ketahanan yang optimal. Selain itu, meskipun biaya material inovatif lebih tinggi, penggunaan material ini dapat mengurangi waktu siklus dan meningkatkan efisiensi perakitan, memberikan penghematan jangka panjang. Pemetaan hubungan antara material, kinerja, dan efisiensi produksi menunjukkan pentingnya pemilihan material yang tepat sesuai kebutuhan aplikasi manufaktur. Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk mengkaji lebih dalam dampak penggunaan material inovatif pada berbagai jenis kendaraan di Indonesia dan mempercepat adopsi teknologi cerdas seperti AI dan big data dalam proses produksi.

5. REFERENSI

- Abdelaal, A. F., Chakrobarty, A., Sakib, N., Mustafi, A., & Haque, E. (2025). Porosity, residual stress, wear properties and impact toughness of additively manufactured low-alloy steel: A review. *Next Materials*, 9(October), 101288. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101288>
- Abidin, A. A., Hasrudy, Z., Muharni, R., & Nugroho, D. H. (2025). *Dasar-Dasar Teknik Mesin* (First Edit). CV Pustaka Buku Nusantara.
- Akbari, P., Zamani, M., & Mostafaei, A. (2024). Machine learning prediction of mechanical properties in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 91(July), 104320.

- <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104320>
- Armstrong, M., Mehrabi, H., & Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84(September), 1001–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
- Baris, S., Ipek, R., Baris, S. T., & Baris, I. (2026). Expanding the Phenotypic Spectrum of NDUFS6-Related Disease: From Neonatal Mitochondrial Encephalopathy to Childhood-Onset Axonal Neuropathy. *International Journal of Molecular Sciences*, 27, 1375. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijms27031375>
- Candela, A., Sandrini, G., Gadola, M., Chindamo, D., & Magri, P. (2024). Heliyon Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods. *Heliyon*, 10(8), e29728. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29728>
- Hasan, R., Govindaraj, P., Salim, N., Antiohos, D., Konstantin, F., & Hameed, N. (2025). Digitalization of composite manufacturing using nanomaterials based piezoresistive sensors. *Composites Part A*, 188(September 2024), 108578. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108578>
- Hosseini, Faezeh, & Asad, A. (2024). Microstructure Characterization and Mechanical Properties of Al6061 Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8, 288. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmmp8060288>
- Huangfu, B. (2024). Anisotropy of Additively Manufactured Metallic Materials. *Materials*, 17, 3653. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17153653>
- Jadhav, S., Kusekar, S., Belure, A., & Digole, S. (2025). *Recent Progress and Scientific Challenges in Wire-Arc Additive Manufacturing of Metallic Multi-Material Structures*. 1–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmmp9080284>
- Khan, F., Hossain, N., Jannat, J., Maksudur, S. M., & Iqbal, J. (2025). Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research*, 13(February 2024), 1001–1023. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
- Kim, J., Kim, J., & Pyo, C. (2020). Comparison of Mechanical Properties of Ni-Al-Bronze Alloy Fabricated through Wire Arc Additive Manufacturing with Ni-Al-Bronze Alloy Fabricated through Casting. *Metals*, 10, 1164. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met10091164>
- Liu, Q., Chen, W., Yakubov, V., Kruzic, J. J., Wang, C. H., & Li, X. (2024). Interpretable machine learning approach for exploring process-structure-property relationships in metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 85(February), 104187. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104187>
- Love, A., Alejandro, O., Pastrana, V., Behseresht, S., & Park, Y. H. (2025). Advancing Metal Additive Manufacturing: A Review of Numerical Methods in DED, WAAM, and PBF. *Metrology*, 5, 30. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/metrology5020030>
- Phiri, R., Mavinkere, S., & Siengchin, S. (2024). Heliyon Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(21), e39661. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>
- Putera, Akmarul, D., & Fajri, N. (2025). Advancing Electric Vehicle Safety and Adoption in Indonesia: Insights from Global and Local Perspectives. *Engineering Proceedings*, 84, 52. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/engproc2025084052>
- Qiram, I. (2025). JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment. *Journal of Educational Engineering and Environment*, 4(May), 5–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmmp9120396>
- Risaliti, E., Pero, F. Del, Arcidiacono, G., & Citti, P. (2025). Optimizing Lightweight Material Selection in Automotive Engineering: A Hybrid Methodology Incorporating Ashby ' s Method and VIKOR Analysis. *Machines*, 13(63), 63. <https://doi.org/10.3390/machines13010063>
- Schino, Di, A., & Testani, C. (2023). Microstructure and Properties in Metals and Alloys. *Metals*, 13, 1320. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met13071320>
- Siregar, Z. H., Nasution, Mawardi, Fadillah, A., Suherman, & Refiza. (2025). *Evaluasi Kritis dan Model Alternatif Hunter Curves untuk Sistem Plumbing Gedung Bertingkat di Medan*. 11(2), 205–217.
- Siregar, Z. H., Siregar, R., Prinsi Rigitta, N., Puspita, R., Refiza, Zurairah, M., Purba, I. G., & Tanjung, J. H. S. (2024). Pengembangan Aliran Sungai Sebagai Potensi Pembangkit Listrik Mikro Hidro Serta Edukasi dan Akulturasi di Desa Meranti Tengah Dusun Batu Rangin Kecamatan Pintu Pohan Meranti Kabupaten Tobasa. *Jurnal Deputi*, 4(1), 264–269. <https://doi.org/10.54123/deputi.v4i1.325>
- Zhang, S., Soltani, H., Pavan, K., Ajjarapu, K., & Ghasemimotlagh, S. (2025). Additive Manufacturing of 6061 Aluminum by Filament-Based Material Extrusion (MEX): Process Development and Mechanical

Characterization. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9, 396.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmmp9120396>

Zhang, Wen, & Xu, J. (2022). Materials & Design Advanced lightweight materials for Automobiles: A review. *Materials & Design*, 221, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>

Zhang, Z., Yu, C., Ren, G., Shen, S., & Yi, H. (2025). *Laser Additive Manufacturing of Three-Dimensional Porous Structures: Structural Design, Microstructure, Mechanical Properties, and Applications*. 36(January), 3684–3725.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.003>

Zhou, L., Miller, J., Veza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Tamimi, Z. Al, Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24, 2668.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s24092668>