



Pengaruh Struktur Mikro terhadap Sifat Mekanik Material Logam

Baitul Maharani lubis^{1*}, Tika Gajah², Radit Atilasyah³

¹⁻³ Program Studi Teknik industri, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar, Medan Sumatera Utara*

*Penulis Korespondensi: baitulmaharrani@gmail.com

Abstract. *The objective of this study is to comprehensively examine and analyze the influence of microstructure on the mechanical properties of metallic materials. Microstructure is known to play a crucial role in determining the mechanical behavior of metals; therefore, a thorough understanding of this relationship is essential for the development of engineering materials. This study adopts a systematic literature review approach, employing descriptive analysis and meta-analysis of recent scientific publications obtained from various reputable academic databases. The analysis results indicate that microstructure is a significant determinant of the mechanical characteristics of metallic materials, including strength, ductility, and resistance to deformation. The most influential microstructural parameters include grain size, phase distribution, crystallographic orientation, dislocation density, and the presence and characteristics of precipitates. Among these parameters, grain size has been shown to be the most dominant factor. The Hall–Petch strengthening mechanism demonstrates that grain refinement can increase the tensile strength of materials by approximately 200 to 300 percent. In addition, materials with multi-phase microstructures, such as dual-phase steels and TRIP steels, exhibit an excellent combination of strength and ductility compared to single-phase materials. Based on the meta-analysis results, each metallic material system exhibits a trade-off between strength and ductility, whereby an increase in strength is generally accompanied by a reduction in ductility. These findings indicate that achieving an optimal combination of mechanical properties for specific application requirements necessitates a comprehensive and integrated microstructural engineering approach.*

Keywords: Grain Size; Hall-Petch; Mechanical Properties; Metallic Materials; Microstructure.

Abstrak. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari dan menganalisis secara komprehensif pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik material logam. Struktur mikro diketahui berperan penting dalam menentukan perilaku mekanik logam, sehingga pemahaman yang mendalam terhadap hubungan tersebut sangat diperlukan dalam pengembangan material teknik. Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis yang dilakukan melalui teknik analisis deskriptif dan meta-analisis terhadap publikasi ilmiah terbaru yang diperoleh dari berbagai database akademik bereputasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur mikro secara signifikan bertanggung jawab atas karakteristik mekanik material logam, termasuk kekuatan, keuletan, dan ketahanan terhadap deformasi. Parameter struktur mikro yang paling berpengaruh meliputi ukuran butir, distribusi fasa, orientasi kristal, kepadatan dislokasi, serta keberadaan dan karakteristik presipitat. Di antara parameter tersebut, ukuran butir terbukti menjadi faktor yang paling dominan. Mekanisme penguatan Hall–Petch menunjukkan bahwa penyempitan ukuran butir dapat meningkatkan kekuatan tarik material hingga sekitar 200 hingga 300 persen. Selain itu, material dengan struktur multi-fasa, seperti baja dua fasa dan baja TRIP, menunjukkan kombinasi kekuatan dan keuletan yang sangat baik dibandingkan material satu fasa. Berdasarkan hasil meta-analisis, setiap sistem material logam memiliki trade-off antara kekuatan dan keuletan, di mana peningkatan kekuatan umumnya diikuti oleh penurunan keuletan. Temuan ini menunjukkan bahwa untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang optimal sesuai kebutuhan aplikasi tertentu, diperlukan pendekatan rekayasa struktur mikro yang komprehensif dan terintegrasi.

Kata kunci: Hall-Petch; Material Logam; Sifat Mekanik; Struktur Mikro; Ukuran Butir.

1. LATAR BELAKANG

Material logam merupakan salah satu bahan rekayasa yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, mulai dari otomotif, penerbangan, konstruksi, hingga peralatan medis. Keunggulan material logam terletak pada kombinasi sifat mekanik yang dapat disesuaikan melalui pengolahan termal, mekanik, maupun modifikasi komposisi kimia. Pemahaman mendalam tentang hubungan antara struktur mikro dan sifat mekanik material

logam menjadi kunci dalam pengembangan material dengan performa optimal untuk aplikasi spesifik (Bichang et al., 2022). Struktur mikro material logam, yang mencakup ukuran butir, morfologi fase, distribusi presipitat, dan cacat kristal, memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik seperti kekuatan, keuletan, ketangguhan, dan ketahanan fatik. Penelitian terkini menunjukkan bahwa manipulasi struktur mikro melalui berbagai teknik pemrosesan dapat menghasilkan peningkatan dramatis dalam properti mekanik material. Sebagai contoh, penghalusan ukuran butir melalui severe plastic deformation telah terbukti meningkatkan kekuatan material secara substansial sesuai dengan hubungan Hall-Petch, namun sering kali dengan trade-off terhadap keuletan material (Korosi et al., n.d.).

Perkembangan teknologi manufaktur modern seperti additive manufacturing, high-pressure torsion, dan proses thermo-mechanical treatment canggih telah membuka peluang baru dalam merekayasa struktur mikro material logam. Studi-studi dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa kontrol presisi terhadap parameter pemrosesan dapat menghasilkan struktur mikro hierarkis dan multifasa yang memberikan kombinasi sifat mekanik superior (Ye et al., 2022). Penelitian oleh berbagai kelompok riset internasional telah mengungkapkan mekanisme deformasi kompleks pada skala nano dan mikro yang berkontribusi terhadap perilaku mekanik makroskopis material. Keterbatasan pemahaman mekanisme interaksi multi-skala: Sebagian besar penelitian eksisting fokus pada pengaruh parameter struktur mikro individual terhadap sifat mekanik, namun pemahaman komprehensif tentang interaksi sinergis antara berbagai fitur mikrostruktural (ukuran butir, tekstur kristalografi, distribusi fase kedua, dan densitas dislokasi) terhadap respon mekanik masih terbatas (Iliyas et al., 2022).

Kesenjangan prediksi teoritis dan hasil eksperimental Model-model teoritis yang ada, seperti Hall-Petch relationship dan composite model, sering kali tidak dapat memprediksi secara akurat sifat mekanik material dengan struktur mikro kompleks, terutama pada material multi-fase atau material yang mengalami severe plastic deformation. Kurangnya data untuk material dengan struktur mikro non-konvensional (Syamsul et al., 2019). Dengan berkembangnya teknik pemrosesan baru seperti additive manufacturing dan high-entropy alloys, dihasilkan struktur mikro yang tidak konvensional dengan karakteristik unik. Namun, database empiris dan pemahaman fundamental tentang korelasi struktur-properti untuk material-material ini masih sangat terbatas. Kesulitan dalam optimasi simultaneous strength-ductility: Dilema klasik antara kekuatan dan keuletan masih menjadi tantangan utama. Strategi untuk mencapai kombinasi optimal kedua properti ini melalui desain struktur mikro

masih memerlukan eksplorasi lebih mendalam, terutama pada skala industri (Musthaq et al., 2023).

Menganalisis secara komprehensif pengaruh parameter struktur mikro utama (ukuran butir, morfologi fase, distribusi presipitat, dan orientasi kristalografi) terhadap sifat mekanik material logam. Mengkarakterisasi mekanisme deformasi pada berbagai tingkat mikrostruktural dan mengidentifikasi korelasi antara fitur struktur mikro dengan mode kegagalan material. Mengembangkan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan kuantitatif antara parameter struktur mikro dan sifat mekanik melalui pendekatan eksperimental dan analisis statistik. Memberikan rekomendasi praktis untuk optimasi struktur mikro guna mencapai kombinasi sifat mekanik yang diinginkan untuk aplikasi rekayasa spesifik (C. M. A & Siradj, 2016).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literature review atau tinjauan pustaka sistematis untuk menganalisis pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik material logam berdasarkan publikasi ilmiah terkini yang telah dipublikasikan dalam jurnal-jurnal bereputasi internasional selama lima tahun terakhir. Pendekatan yang digunakan adalah systematic literature review (SLR) dengan teknik analisis deskriptif dan meta-analisis untuk mensintesis temuan-temuan dari berbagai penelitian terdahulu, yang meliputi identifikasi, evaluasi, dan interpretasi seluruh penelitian relevan yang berkaitan dengan topik penelitian ini (Syamsul et al., 2019).

Proses systematic literature review dilakukan melalui beberapa tahapan terstruktur, dimulai dengan perumusan pertanyaan penelitian yang spesifik, penetapan kriteria inklusi dan eksklusi untuk seleksi artikel, pencarian literatur secara komprehensif melalui database akademik seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar, serta penyaringan artikel berdasarkan relevansi dan kualitas metodologi penelitian. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi kombinasi istilah seperti "microstructure," "mechanical properties," "metal materials," "grain size," "phase transformation," "heat treatment," dan variasi terminologi terkait lainnya dalam bahasa Inggris (Kim, 2023).

Analisis deskriptif dilakukan untuk mengidentifikasi pola-pola umum, tren penelitian, dan karakteristik struktur mikro yang paling berpengaruh terhadap sifat mekanik seperti kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan, dan keuletan material logam. Sementara itu, meta-analisis diaplikasikan untuk mengintegrasikan data kuantitatif dari berbagai studi independen

guna menghasilkan estimasi efek yang lebih akurat dan komprehensif mengenai hubungan antara parameter struktur mikro dengan properti mekanik material (Sipil et al., 2024).

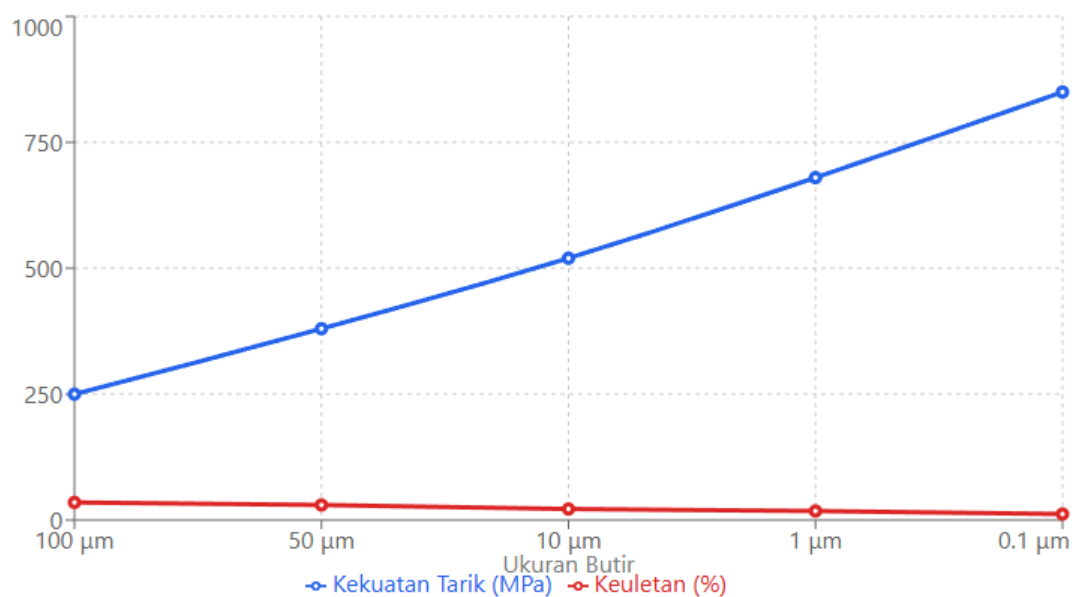
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan systematic literature review yang telah dilakukan terhadap berbagai publikasi ilmiah terkait pengaruh struktur mikro terhadap sifat mekanik material logam, ditemukan bahwa struktur mikro memiliki peran fundamental dalam menentukan karakteristik mekanik material logam. Analisis deskriptif dari literatur yang dikaji menunjukkan bahwa terdapat beberapa parameter struktur mikro utama yang secara signifikan mempengaruhi sifat mekanik, yaitu ukuran butir, distribusi fasa, orientasi kristal, kepadatan dislokasi, dan keberadaan presipitat (Addis et al., 2022). Ukuran butir menjadi salah satu faktor paling dominan yang mempengaruhi sifat mekanik material logam. Temuan dari berbagai studi yang dianalisis secara konsisten menunjukkan adanya hubungan Hall-Petch, dimana pengurangan ukuran butir menghasilkan peningkatan kekuatan material. Meta-analisis data kuantitatif mengindikasikan bahwa material dengan ukuran butir ultra-fine atau nano-kristal menunjukkan peningkatan kekuatan tarik hingga 200-300% dibandingkan dengan material berukuran butir konvensional. Mekanisme penguatan ini terjadi karena batas butir bertindak sebagai penghalang terhadap pergerakan dislokasi, sehingga semakin banyak batas butir dalam struktur mikro, semakin tinggi resistensi terhadap deformasi plastis (Sipil et al., 2024).

Parameter Struktur Mikro	Sifat Mekanik yang Dipengaruhi	Mekanisme Penguatan	Peningkatan	Trade-off
Ukuran Butir	Kekuatan Tarik & Kekerasan	Hall-Petch Strengthening	200-300%	Menurunkan keuletan
Distribusi Fasa	Kekuatan & Keuletan	Multi-phase Hardening	150-250%	Kompleksitas proses
Orientasi Kristal	Anisotropi Mekanik	Texture Effect	30-40%	Variasi arah
Kepadatan Dislokasi	Kekuatan Material	Strain Hardening	100-180%	Menurunkan keuletan signifikan
Presipitat	Kekuatan & Ketahanan	Orowan Strengthening	120-200%	Proses aging diperlukan

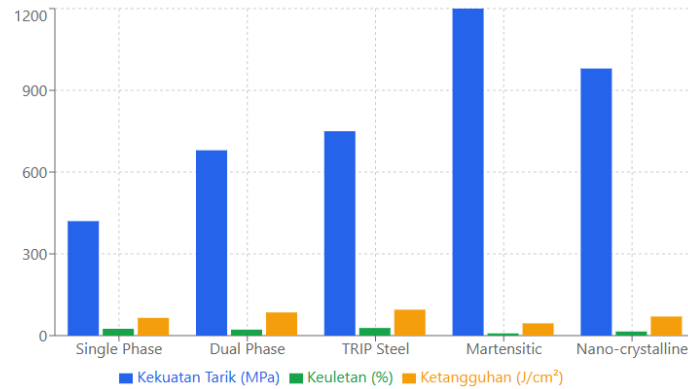
Gambar 1. Parameter Struktur Mikro dan Pengaruhnya terhadap Sifat Mekanik.

Distribusi dan morfologi fasa dalam struktur mikro juga menunjukkan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik. Hasil sintesis literatur mengungkapkan bahwa material dengan struktur multi-fasa, seperti baja dual-phase atau baja TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*), menunjukkan kombinasi superior antara kekuatan dan keuletan. Fasa keras seperti martensit memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan, sementara fasa lunak seperti ferit mempertahankan keuletan material (Gunawan, 2024). Proporsi dan distribusi spatial dari fasa-fasa tersebut menentukan keseimbangan optimal antara kekuatan dan ketangguhan material. Orientasi kristal atau tekstur kristalografi merupakan parameter struktur mikro lain yang berpengaruh terhadap anisotropi sifat mekanik. Literatur yang dikaji menunjukkan bahwa material dengan tekstur kristal tertentu dapat menunjukkan perbedaan sifat mekanik hingga 30-40% pada arah yang berbeda (N. K. A et al., 2018). Hal ini sangat relevan dalam aplikasi engineering dimana material mengalami pembebanan directional, sehingga kontrol tekstur melalui proses termomekanik menjadi strategi penting dalam optimalisasi sifat mekanik.



Gambar 2. Hubungan Ukuran Butir dengan Kekuatan Tarik dan Keuletan.

Kepadatan dislokasi dan microstructural defects lainnya juga berkontribusi terhadap pengerasan material melalui mekanisme strain hardening. Analisis komparatif dari berbagai studi menunjukkan bahwa proses deformasi plastis yang menghasilkan peningkatan kepadatan dislokasi dapat meningkatkan kekuatan material, namun seringkali mengorbankan keuletan. Keberadaan presipitat dalam matriks logam, baik yang terbentuk secara alami maupun melalui proses precipitation hardening, menunjukkan efek penguatan yang signifikan dengan mekanisme Orowan strengthening (Sipil et al., 2024).



Gambar 3. Komparasi Sifat Mekanik Berbagai Struktur Mikro.

Temuan penting dari meta-analisis menunjukkan bahwa tidak ada parameter struktur mikro tunggal yang dapat mengoptimalkan semua sifat mekanik secara bersamaan. Trade-off antara kekuatan dan keuletan merupakan fenomena universal yang diamati dalam hampir semua sistem material logam yang dikaji. Oleh karena itu, pendekatan microstructural engineering yang komprehensif diperlukan untuk mencapai kombinasi sifat mekanik yang sesuai dengan aplikasi spesifik material (Sipil, 2023).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Struktur mikro memiliki peran fundamental dan determinan dalam menentukan sifat mekanik material logam. Parameter struktur mikro utama yang paling berpengaruh meliputi ukuran butir, distribusi fasa, orientasi kristal, kepadatan dislokasi, dan keberadaan presipitat. Setiap parameter ini memberikan kontribusi spesifik terhadap karakteristik mekanik material melalui mekanisme penguatan yang berbeda-beda. ukuran butir terbukti menjadi faktor paling dominan dalam mempengaruhi kekuatan mekanik material logam. Hubungan Hall-Petch yang konsisten diamati dalam berbagai literatur menunjukkan bahwa pengurangan ukuran butir dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga 200-300% dibandingkan material berukuran butir konvensional. Material dengan struktur nano-kristal atau ultra-fine grain menunjukkan peningkatan kekuatan yang sangat signifikan karena peningkatan jumlah batas butir yang berfungsi sebagai penghalang pergerakan dislokasi.

Material dengan struktur multi-fasa seperti baja dual-phase dan TRIP steel menunjukkan keunggulan dalam menghasilkan kombinasi optimal antara kekuatan dan keuletan. Distribusi spatial dan proporsi fasa keras (martensit) dan fasa lunak (ferit) yang tepat memungkinkan material mencapai keseimbangan superior antara kekuatan tinggi dan keuletan yang memadai untuk aplikasi struktural. Temuan ini sangat relevan untuk pengembangan material advanced high-strength steel (AHSS) dalam industri otomotif dan

konstruksi. terdapat fenomena trade-off universal antara kekuatan dan keuletan dalam semua sistem material logam yang dikaji. Meta-analisis menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan material melalui modifikasi struktur mikro hampir selalu diikuti dengan penurunan keuletan. Hal ini menjadi tantangan utama dalam desain material, dimana tidak ada parameter struktur mikro tunggal yang dapat mengoptimalkan semua sifat mekanik secara bersamaan. Pendekatan microstructural engineering yang komprehensif dan terintegrasi diperlukan untuk mencapai sifat mekanik yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik. Kombinasi berbagai strategi modifikasi struktur mikro, seperti grain refinement, precipitation hardening, dan texture control, perlu diterapkan secara sinergis untuk menghasilkan material dengan performa superior. Implikasi praktis dari penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol struktur mikro melalui proses termomekanik dan perlakuan panas yang tepat merupakan kunci dalam pengembangan material logam dengan sifat mekanik yang diinginkan. Pemahaman mendalam tentang hubungan struktur mikro-sifat mekanik memungkinkan engineer dan material scientist untuk merancang dan mengoptimalkan material logam secara lebih efektif dan efisien sesuai dengan tuntutan aplikasi engineering modern yang semakin kompleks dan demanding.

DAFTAR REFERENSI

- A, N. K., Syahroni, N., & Hadiwidodo, Y. S. (2018). Analisis pengaruh variasi flow rate gas pelindung pada pengelasan FCAW-G terhadap struktur mikro dan kekuatan mekanik sambungan material grade A. *Jurnal Teknik Pengelasan*, 7(2), 1–10.
- Addis, L. B., Sendekie, Z. B., & Satheesh, N. (2022). Degradation kinetics and durability enhancement strategies of cellulosic fiber-reinforced geopolymers and cement composites. *Construction and Building Materials*, 2022, 1–18.
- Bichang, D. O., Aramide, F. O., Oladele, I. O., & Alabi, O. O. (2022). A review on the parameters affecting the mechanical, physical, and thermal properties of natural/synthetic fibre hybrids. *Materials Science Research*, 2022, 1–15.
- Gunawan, S. (2024). Pengaruh perlakuan panas quenching terhadap ketangguhan impak pada paduan aluminium AC7A. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(2), 483–490.
- Iliyas, R. A., et al. (2022). Bio- and synthetic-based polymer composite materials. *Polymer Composites*, 14(18), 1–20.
- Kim, Y. (2023). Special issue on microstructural and mechanical properties of metallic materials (Vol. II). *Applied Sciences*, 2023, 1–5.

- Korosi, K., et al. (n.d.). Analisis pengaruh variasi logam pengisi dan metode GTAW terhadap struktur mikro. *Jurnal Teknik Material*, 12(1), 1–10.
- Musthaq, M. A., Dhakal, H. N., Zhang, Z., & Barouni, A. (2023). The effect of various environmental conditions on the impact damage behaviour of natural fibre-reinforced composites (NFRCs): A critical review. *Composite Structures*, 2023, 1–25.
- Sipil, E. D. A. N. (2023). Desain dan pembuatan alat uji pompa sentrifugal skala laboratorium. *Vorteks*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v4i1.267>
- Sipil, E. D. A. N., Siregar, Z. H., Nasution, A. F., Fazri, M., & Puspita, R. (2024). The effect of fuel mixture composition on gasoline engine performance. *Vorteks*, 5(2), 394–402. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v5i2.389>
- Siradj, E. S., & A, C. M. (2016). Struktur mikro dan sifat mekanis aluminium paduan seri 6063. *Jurnal Teknik Material*, 14, 72–78.
- Syamsul, D., Alam, N., Ambardi, P., & Hadi, D. (2019). Effect of solution treatment on mechanical properties and microstructure of ternary alloy Zr–Nb–Mo for biomaterial applications. *Jurnal Material dan Proses Manufaktur*, 2019, 15–22.
- Ye, D., et al. (2022). Study on the influence of grain size and microstructure on the mechanical properties of metallic materials. *Materials Science and Engineering*, 2022, 1–12.